



Trabajo Fin de Grado

Cálculo de sobretensiones en la conexión de baterías de condensadores a la red.

Autor: Marcelo Arizaga Foronda

Tutor: Juan Carlos Burgos

Madrid, 23 de Septiembre de 2014

Agradecimientos

A mi madre por darme la oportunidad de formarme en otro país y por su lucha constante para sacarnos adelante a mí y a mi hermano Víctor.

A mi esposa por apoyarme incondicionalmente en los momentos más duros de mi vida y por contar con su compañía.

A mis amigos que sin duda alguna me han demostrado su aprecio y me han enseñado el valor de la amistad.

A mis colegas de la universidad por dejarme ser parte de la experiencia vital que hemos tenido en la universidad, en especial a Alfredo, Nacho, Javi y Manuel.

A todos mi compañeros de trabajo que se han prestado para hacerme muchos favores cuando no podía compatibilizar los estudios con el trabajo, y en especial a Manuel, Ana y Marimar.

A mi tutor por ayudarme a realizar el proyecto, por sus consejos, por enseñarme un buen método de trabajo, y por hacer el enorme esfuerzo de verme cuando no se encontraba en buenas condiciones físicas.

A todos los que con su ayuda me han hecho mejor persona y me han permitido que finalice mis estudios.

Contenido

CAPITULO 1.....	4
INTRODUCCIÓN	5
PROBLEMÁTICA.....	7
INTERÉS SOCIAL DEL TEMA.....	10
OBJETIVOS	10
CAPITULO 2.....	11
ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS TRANSITORIOS DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE BATERÍAS DE CONDENSADORES	11
2.1 Transitorios en la conexión de baterías de condensadores	12
2.2 Baterías de condensadores de dos escalones.....	17
2.3 Transitorio de desconexión de una batería de condensadores.....	24
2.4 Baterías de condensadores trifásicas con neutro puesto a tierra.	29
2.5 Baterías de condensadores trifásicas con neutro aislado.	30
CAPÍTULO 3.....	35
SIMULACIÓN DE CASOS Y RESULTADOS.....	35
3.1 Simulación.....	35
3.2 Programa utilizado	36
3.3 Planteamiento de casos.....	38
3.3.1 Transitorio de conexión de un condensador a la red.	38
3.3.2 Transitorio de conexión de una batería de condensadores de dos escalones....	46
3.3.3 Transitorio de conexión de una batería de condensadores por escalones, sin reactancias limitadoras.	55
3.3.4 Transitorio de desconexión de una batería de condensadores a la red.	61
3.3.5 Transitorio de desconexión de baterías trifásicas con neutro aislado.....	73
CAPÍTULO 4.....	84
4.1 Resumen del trabajo realizado y conclusiones de los estudios	84
4.2 Estudio económico del Trabajo Fin de Grado	89
4.3 Propuesta de trabajos futuros	90
BIBLIOGRAFÍA	91

CAPITULO 1

ABSTRACT

Most loads that are connected to an electric system has coils or motors in which a magnetic field exists. Such items require a fluctuating energy over time (consumed on the network in a quarter cycle to create the magnetic field and returned to the network in the next quarter cycle by reducing the magnetic field to zero). This fluctuating power superimposed on the average power is what is known as reactive power.

The electric charge that consumes a high reactive power is not desirable in a power system for three reasons.

- First, the current drawn by a load demand active power and reactive power exceeds the load would sue only active power, and therefore all elements of the system (circuit breakers, conductors, transformers, etc) must be designed for a higher current and thus the installation cost increases.

- Secondly, this increased demand load current consumed active power and reactive power through a series of elements, such as transformers, conductors, etc, causing losses of active power and making the performance of the system decreases.

- Third, this increased demand load current brings in elements spanning (transformers, conductors) some voltage drops that cause the voltage to the load (and the rest of the consumers connected in parallel with it) decrease.

To overcome these drawbacks can use capacitor banks to supply the reactive power demand of the loads. Its low cost has allowed its use is widespread, but the limitation is facing charges whose reactive power demand is variable causes other systems such as synchronous compensators (STATCOM) and fixed (SVC) are chosen.

However, the connection and disconnection of capacitor may cause harmful transients for the capacitor and to the adjacent elements (cables, transformers, motors, other consumers, etc) or network disturbances which reduce the quality of the electrical energy receive other network clients. These transients result in overcurrent and overvoltage.

The study of transients that occur in the connection and disconnection of capacitor banks is necessary to understand the factures that influence the amount of overvoltage and overcurrent are reached and know how to buffer these transitory and meet the requirements of quality and safety required by law.

The subject Electrical Installations Degree in Electrical Engineering from the University Carlos III of Madrid surges networks are studied, including the surge in the connection and disconnection of capacitor banks. This Final Project Work was raised as an aid to said subject, and aims to develop a series of computer models that can be used by students of the subject to understand more clearly the origin and characteristics of these transients.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las cargas que se conectan a un sistema eléctrico dispone de bobinas o motores en los cuales existe un campo magnético. Este tipo de elementos requieren una energía fluctuante en el tiempo (se consume de la red en un cuarto de ciclo para crear el campo magnético y se devuelve a la red en el cuarto de ciclo siguiente al reducirse el campo magnético a cero). Esta potencia fluctuante superpuesta a la potencia media es lo que se denomina potencia reactiva.

El que una carga eléctrica consuma una potencia reactiva elevada no es deseable en un sistema eléctrico por tres motivos.

- En primer lugar la corriente que consume una carga que demanda potencia activa y potencia reactiva es superior a la que demandaría una carga que sólo demandara potencia activa, y por ello todos los elementos de la instalación (interruptores automáticos, conductores, transformadores, etc) han de ser dimensionados para una corriente mayor y por tanto el coste de la instalación aumenta.
- En segundo lugar, esta mayor corriente que demanda una carga que consume potencia activa y potencia reactiva atraviesa una serie de elementos, como son transformadores, conductores, etc, provocando unas pérdidas de potencia activa y haciendo que el rendimiento de la instalación disminuya.
- En tercer lugar, esta mayor corriente que demanda la carga ocasiona en los elementos que atraviesa (transformadores, conductores) unas caídas de tensión que hacen que la tensión que llega a la carga (y al resto de los consumidores conectados en paralelo con ella) disminuya

Para solucionar estos inconvenientes se pueden utilizar baterías de condensadores para abastecer la energía reactiva que demandan las cargas. Su reducido coste ha permitido que esté ampliamente extendido su uso, aunque la limitación que tiene frente a las cargas cuya demanda de potencia reactiva es variable hace que se elijan otros sistemas como los compensadores síncronos (STATCOM¹) y fijos (SVC²).

Sin embargo, la conexión y desconexión de baterías de condensadores puede provocar transitorios perjudiciales para el propio condensador y para los elementos adyacentes (cables, transformadores, motores, otros consumidores, etc) o perturbaciones en la red que reduzcan la calidad de la energía eléctrica que reciben otros clientes de la red. Estos transitorios se traducen en sobreintensidades y sobretensiones.

El estudio de los transitorios que tienen lugar en la conexión y desconexión de las baterías de condensadores es necesario para comprender los factores que influyen en la cuantía de las sobretensiones y sobreintensidades que se alcanzan y conocer la forma de

¹ STATCOM: Static synchronous Compensator

² SVC: Static Volt ampere reactive Compensator

amortiguar dichos transitorios y cumplir los requisitos de calidad y seguridad que se exige por normativa.

En la asignatura Instalaciones Eléctricas del Grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid se estudian las sobretensiones en las redes, incluyendo las sobretensiones en la conexión y desconexión de baterías de condensadores. Este Trabajo Fin de Grado se planteó como una ayuda a la mencionada asignatura, y tiene por finalidad desarrollar una serie de modelos informáticos que puedan ser utilizados por los alumnos de la asignatura para comprender de forma más clara el origen y características de estos transitorios.

PROBLEMÁTICA

La razón por la cual se conecta una batería de condensadores es la de inyectar reactiva en el sistema para cubrir la demanda de reactiva de las cargas, cuyos receptores finales son los usuarios y la industria.

Circuitos oscilantes

Para obtener un circuito oscilante es necesario conectar una bobina en serie o en paralelo con un condensador. En la bobina se almacena la energía en forma de campo magnético y en el condensador la energía se almacena en forma de campo eléctrico. La interacción de estos dos elementos resulta en el flujo de la energía que uno almacena hacia el otro. El ejemplo clásico que se utiliza para facilitar la comprensión de este fenómeno es el ejemplo del péndulo.

La analogía viene a decir que la energía que tiene el sistema sólo se transforma, en el caso del péndulo la energía cinética se transforma en energía potencial y viceversa. En el caso del circuito oscilante la energía magnética en la bobina se transforma en energía estática en el condensador.

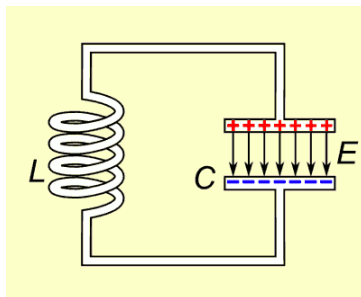


Figura 1.1 Circuito LC

$$E_{\text{condensador}} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.1)$$

$$E_{\text{bobina}} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.2)$$

La figura 1.1 ilustra el ejemplo mencionado.

Para obtener la frecuencia de oscilación del circuito en el caso de un circuito serie se igualan las reactancias de ambos elementos.

$$X_L = j\omega L \quad (1.3)$$

$$X_C = -j \frac{1}{\omega C} \quad (1.4)$$

Igualando la ecuación (1.3) y la ecuación (1.4), con $\omega = 2\pi f$ se obtiene:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (1.5)$$

Y despejando:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.6)$$

Donde f_0 se denomina frecuencia propia del circuito, L la inductancia de la bobina, y C la capacidad del condensador. Esta es la fórmula de Thomson, y es válida tanto para circuitos serie como paralelo (en el caso de un circuito paralelo habría que igualar las suceptancias).

La amplitud de la tensión depende del valor de tensión inicial del condensador. En el caso de que existan elementos resistivos (por ejemplo, la propia resistencia del cable), las oscilaciones empiezan en un valor máximo y van decreciendo en función del amortiguamiento del circuito, es decir, del valor de la resistencia que debe evacuar la energía en forma de calor por efecto Joule.

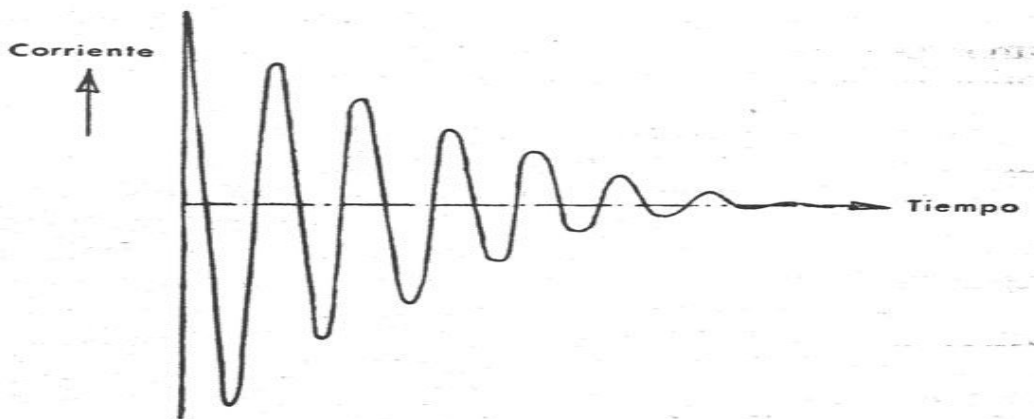


Figura 1.2 Onda de corriente amortiguada

En la figura 1.2 se observa el efecto de la resistencia en la onda oscilante, la evacuación de la energía por medio de la resistencia produce menores amplitudes tanto de la onda de tensión como de la corriente.

El efecto Ferranti

Cuando se conecta una batería de condensadores en paralelo a la carga, la tensión en régimen permanente es ligeramente superior a la de la red cuando no hay carga conectada o esta es muy pequeña en el punto de conexión. El efecto Ferranti, explica que cuando hay una carga capacitiva al final de la línea, la tensión al final de la línea es mayor debido a que la caída de tensión es negativa en la línea.

Para ilustrar el efecto Ferranti se puede ver la figura 1.3 y 1.4 en la que se muestra el circuito del modelo y el diagrama fasorial de una línea monofásica inductiva conectada a una carga inductiva, en ella se puede ver que la tensión en la carga, V_2 , es menor que la

tensión al principio de la línea, V_1 , esto es debido a la caída interna de tensión en la línea, es decir, la caída de tensión es positiva.

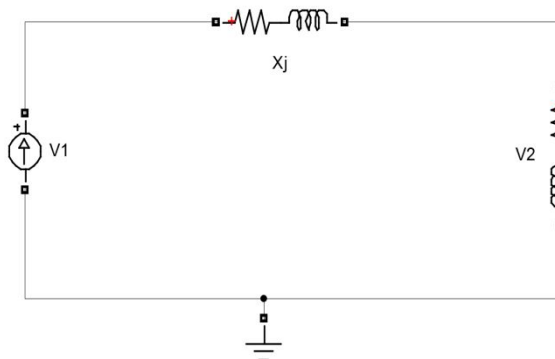


Figura 1.3 Circuito con una carga inductiva

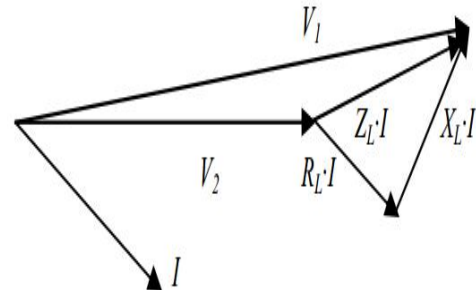


Figura 1.4 Diagrama fasorial del circuito

Sin embargo cuando se conecta un condensador al final de la línea la caída de tensión es negativa con lo cual la tensión V_2 es mayor que V_1 . En la figura 1.5 y 1.6 se muestra el modelo del circuito con el condensador conectado al final de la línea y el diagrama fasorial resultante.

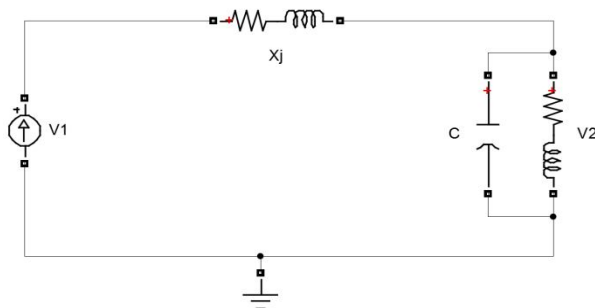


Figura 1.5 Circuito con carga capacitiva

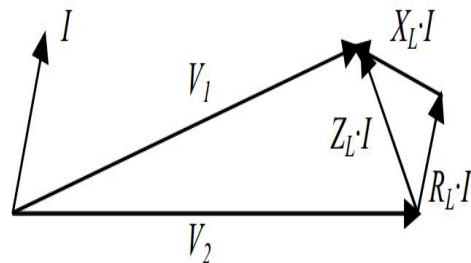


Figura 1.6 Diagrama fasorial del circuito

Por tanto en este trabajo nos encontraremos tanto con los circuitos oscilantes como con los efectos de que la tensión sea mayor en el final de la línea que habitualmente es la conexión con la subestación de distribución debidos al efecto Ferranti.

INTERÉS SOCIAL DEL TEMA

En este trabajo se realizarán simulaciones del comportamiento de las maniobras de conexión y desconexión de baterías de condensadores, para estudiar las sobretensiones y sobrecorrientes que se producen y comprender mejor las características de los fenómenos transitorios, su valor en amplitud y en frecuencia.

Este tipo de transitorios pueden ser perjudiciales para los equipos conectados a la red, y casos extremos pueden llegar a provocar la destrucción de los equipos eléctricos con el consiguiente encarecimiento del sistema.

El interés social que este tipo de estudios es el de determinar las medidas que se deben tomar para reducir la magnitud de los procesos transitorios y conseguir un correcto funcionamiento del sistema eléctrico. De igual manera, el conocimiento de la cuantía de las sobretensiones y sobreintensidades que afectan a los diferentes equipos permite elegir el aislamiento de dichos equipos para que sean capaces de soportar los transitorios producidos en el sistema eléctrico.

Las redes eléctricas están sometidas a sobretensiones y sobrecorrientes que pueden interrumpir el suministro eléctrico, causar grandes pérdidas económicas e incluso dañar los dispositivos electrónicos de los hogares. Es por eso que el estudiar el origen de las sobretensiones, estimar su valor y conocer sus características más importantes son fundamentales para cualquier estudio de aislamientos y elegir el mejor método para proteger a los mismos, alargar su vida útil y en última instancia para proteger a los trabajadores que trabajan in situ, en los centros de generación, subestaciones, redes de distribución y en acometidas para usuarios.

OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen en este trabajo son:

1. Estudio teórico de diferentes transitorios de conexión y desconexión de baterías de condensadores.
2. Desarrollar herramientas de simulación que puedan ser utilizadas por estudiantes de la asignatura Instalaciones Eléctricas para el estudio de casos.
3. Confirmar mediante simulaciones, con valores normalizados de tensión, la validez de las simplificaciones que se aceptan al estudiar la teoría y comparar los resultados obtenidos de una simulación detallada con los obtenidos mediante fórmulas aproximadas.
4. Analizar los factores más importantes que influyen en la cuantía de las magnitudes transitorias en cada caso simulado.

CAPITULO 2

ANALISIS TEÓRICO DE LOS TRANSITORIOS DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE BATERÍAS DE CONDENSADORES

En el presente capítulo se describen los principales problemas que tienen lugar en la conexión y desconexión de baterías de condensadores. El capítulo comienza analizando los problemas de conexión y desconexión de baterías de condensadores monofásicas y posteriormente se analizan las particularidades de las baterías de condensadores trifásicas en función del tipo de puesta a tierra del neutro. En cada uno de los apartados se hace una pequeña presentación del problema, se plantean las ecuaciones matemáticas que definen el problema, se proporciona el aspecto de la solución, se dibujan las formas de onda de tensiones e intensidades y se extraen una serie de conclusiones. En los apartados, sin embargo, no se realiza el tratamiento matemático detallado de las ecuaciones del problema, que puede encontrarse en la bibliografía especializada.

2.1 Transitorios en la conexión de baterías de condensadores

La operación de maniobra de conexión de una batería de condensadores puede dar lugar a sobretensiones que pueden sobrepasar ampliamente la tensión de operación de la red. Estas sobretensiones pueden dar lugar a un mal funcionamiento en equipos que sean sensibles a estas perturbaciones, resultando así en una baja calidad de la energía.

Para estudiar el problema de la conexión de baterías de condensadores partiremos de la Figura 2.1, donde la red a la que se conecta el condensador ha sido representada por su equivalente Thèvenin. Por simplicidad la red se ha supuesto puramente inductiva. La inductancia interna de la red depende de la potencia de cortocircuito de la red (S_{cc}) en el punto en el cual se conecta el condensador (Martínez Velasco, 2007).

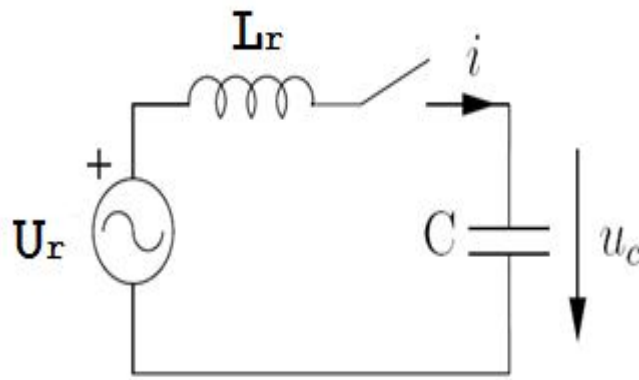


Figura 2.1 Equivalente Thèvenin del sistema, y banco de condensadores.

La inductancia interna de la red es:

$$L_r = \frac{X_r}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_L^2}{S_{cc}}$$

Donde X_r es la impedancia de la red, f la frecuencia de la red, U_L la tensión de línea y S_{cc} la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión.

La capacidad C de la batería de condensadores depende de la potencia reactiva (Q_c) de la misma.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{Q_c}{2\pi f U_L^2}$$

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del circuito de la figura 2.1 son

$$u(t) = L_r \frac{di}{dt} + u_c \quad (2.1)$$

La corriente sigue la siguiente expresión:

$$i = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.2)$$

Introduciendo la ecuación (2.2) en la ecuación (2.1) se obtiene:

$$u(t) = L_r C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c \quad (2.3)$$

En esta ecuación diferencial el dato conocido es la tensión de la red $u(t)$, y la incógnita la tensión en el condensador $u_c(t)$.

Para resolver una ecuación diferencial es preciso tener en cuenta las condiciones de contorno del problema. Las condiciones de contorno recogen el concepto de que la energía almacenada en un sistema no puede variar de forma discontinua, pues para ello se precisaría aportar o drenar una potencia infinita al sistema durante un tiempo muy breve.

La energía almacenada en un condensador está relacionada con la tensión en bornas del mismo:

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (2.4)$$

Por tanto la tensión en bornas de un condensador debe ser una función continua en el tiempo.

La energía almacenada en una bobina está relacionada con la corriente que la atraviesa

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2 \quad (2.5)$$

Inicialmente supondremos que el condensador está descargado $u_c(t=0)=0$, y, dado que el interruptor está cerrado inicialmente la corriente es nula en el instante inicial $i_c(t=0)=0$.

El transitorio más violento se dará cuanto mayor sea la diferencia entre la tensión de la red y la tensión en el condensador en el instante inicial. Por ello supondremos que la tensión de la red pasa por un máximo en $t=0$, de esta manera la onda de tensión de la red se ajusta a la siguiente ecuación (Martínez Velasco, 2007):

$$u(t) = \sqrt{2} U \cos \omega t \quad (2.6)$$

Donde la pulsación de la red es:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.7)$$

Y f la frecuencia de la red, que para España es de 50 Hz.

Con todo ello la solución de la ecuación (2.3) es

$$u_c(t) = \frac{\sqrt{2}U\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} [\cos \omega t - \cos \omega_0 t] \quad (2.8)$$

Donde ω_0 es la frecuencia angular (pulsación) natural del sistema LC

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_r C_1}} \quad (2.9)$$

La frecuencia natural se puede expresar en función de los datos del problema

$$f_0 = f \cdot \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (2.9 \text{ bis})$$

Donde Q_c es la potencia de la batería de condensadores.

Como la potencia de cortocircuito de la red suele ser mucho mayor a la potencia reactiva de la batería, la frecuencia natural del sistema es mucho mayor que la frecuencia de la red ($\omega_0 \gg \omega$) y la expresión (2.8) queda:

$$u_c(t) = \sqrt{2}U \cdot (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2.8 \text{ bis})$$

En todo este estudio hemos supuesto la red puramente inductiva, despreciando la resistencia de la misma. En estas circunstancias el transitorio jamás se amortiguaría. Sin embargo, si consideramos la resistencia de los conductores, el transitorio se va amortiguando al transcurrir el tiempo como se ve en la figura 2.2

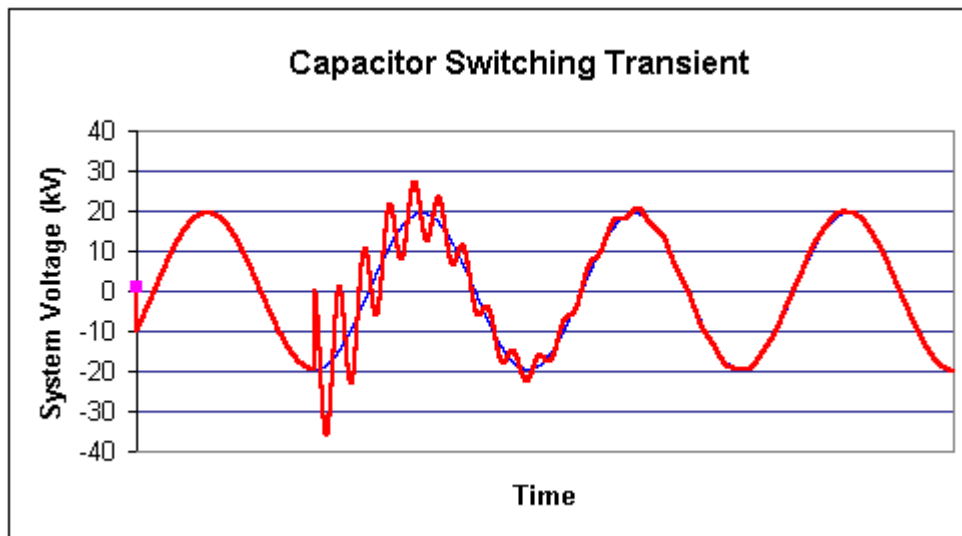


Figura 2.2 Tensión en el condensador (rojo), y tensión de red (azul)

De la ecuación (2.8 bis) se deduce que, en ausencia de amortiguación del sistema, la máxima tensión que se puede alcanzar en el condensador es 2 pu.

Como se puede observar de la ecuación (2.9 bis) la frecuencia natural de oscilación producida en la red será tanto mayor cuanto más pequeña sea la potencia de la batería de condensadores respecto de la potencia de la red.

Por tanto para redes fuertes el problema de la resonancia es intrínseco a la potencia de la red. Para mitigar este problema podemos aumentar la potencia del banco de condensadores, aunque esto suponga un mayor desembolso económico.

La intensidad consumida de la red durante el transitorio se obtiene de las ecuaciones (2.2) y (2.8 bis)

$$i_c(t) = \sqrt{2}UC \cdot (-\omega \sin \omega t + \omega_0 \sin \omega_0 t) \quad (2.10)$$

Y expresándolo en función de la intensidad nominal de la batería queda

$$i_c(t) = \sqrt{2} \frac{U}{X_c} \left(-\sin \omega t + \frac{\omega_0}{\omega} \sin \omega_0 t \right) \quad (2.10 \text{ bis})$$

El segundo sumando de la ecuación puede llegar a ser muy elevado si $\omega_0 \gg \omega$, lo cual nos da a entender que el valor de la sobrecorriente será bastante grande para redes fuertes.

Hasta aquí se ha supuesto que la batería de condensadores está inicialmente descargada. Sin embargo cuando un condensador está cargado y abrimos el interruptor, el condensador queda aislado de la fuente y mantiene su carga, esto ocurre cuando no hay una resistencia que permita disipar la energía almacenada en el condensador.

Cuando se vuelva a conectar el condensador a la red se tendrá un transitorio como el analizado anteriormente. Sin embargo en este caso la condición de contorno para el condensador ahora es que en $t=0$ la tensión es distinta de cero. La situación más desfavorable se da cuando la diferencia entre la tensión a la que se ha quedado cargado el condensador en el anterior ciclo y la tensión de la red sea la máxima posible, esto es, si el condensador tiene una tensión máxima negativa y se acierta a cerrar el interruptor cuando la tensión de red pasa por un máximo positivo.

Si se repite el estudio para las nuevas condiciones de contorno la tensión en el condensador resulta ser

$$u_c(t) = \frac{\sqrt{2}E\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} [\cos \omega t - \cos \omega_0 t] - E\sqrt{2} \cos \omega_0 t \quad (2.11)$$

Si como antes admitimos $\omega_0 \gg \omega$ queda

$$u_c(t) = \sqrt{2}E \cos \omega t - 2E\sqrt{2} \cos \omega_0 t \quad (2.11 \text{ bis})$$

Como se puede apreciar el problema es ahora mucho mayor, puesto que la tensión puede llegar a valer 3 (pu) en el caso de que el amortiguamiento sea muy reducido, este valor es muy elevado y pone en peligro la seguridad de las instalaciones.

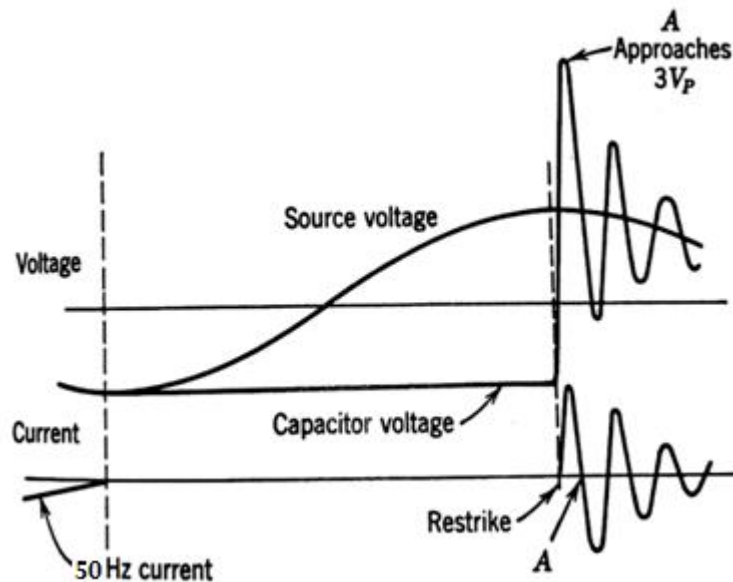


Figura 2.3 Conmutación del condensador en el momento de tensión máxima

Como podemos observar en la figura 2.3 los valores de tensión en el condensador sobrepasan ampliamente los nominales, por tanto si se dispone de un mecanismo que regule el momento en el que se realiza la conexión y el reenganche de las baterías de condensadores, para reducir la sobretensión ó el paso por un máximo de la tensión, se conseguirá prolongar la vida de la instalación y los aislamientos.

En la actualidad existen baterías de condensadores gobernadas electrónicamente que se conectan cuando la tensión de la red es idéntica a la de la batería de condensadores, estos dispositivos disponen de resistencias de descarga para evitar que la instalación trabaje en condiciones no óptimas.

2.2 Baterías de condensadores de dos escalones.

No es deseable que la potencia reactiva de una instalación eléctrica esté sobrecompensada, pues si así fuera se produciría el Efecto Ferranti, que consiste en una sobretensión permanente en la red. Por esa razón, en ocasiones las baterías de condensadores están compuestas por una serie de escalones que se van conectando a medida que el consumo de potencia reactiva de la red es mayor. La razón para utilizar esta configuración es que cuando se conectan las baterías, éstas dan un valor fijo de reactiva permitiendo el control de tensión. En la figura 2.4 se observa el efecto que tiene el uso de las baterías de condensadores en el control de la tensión de la red.

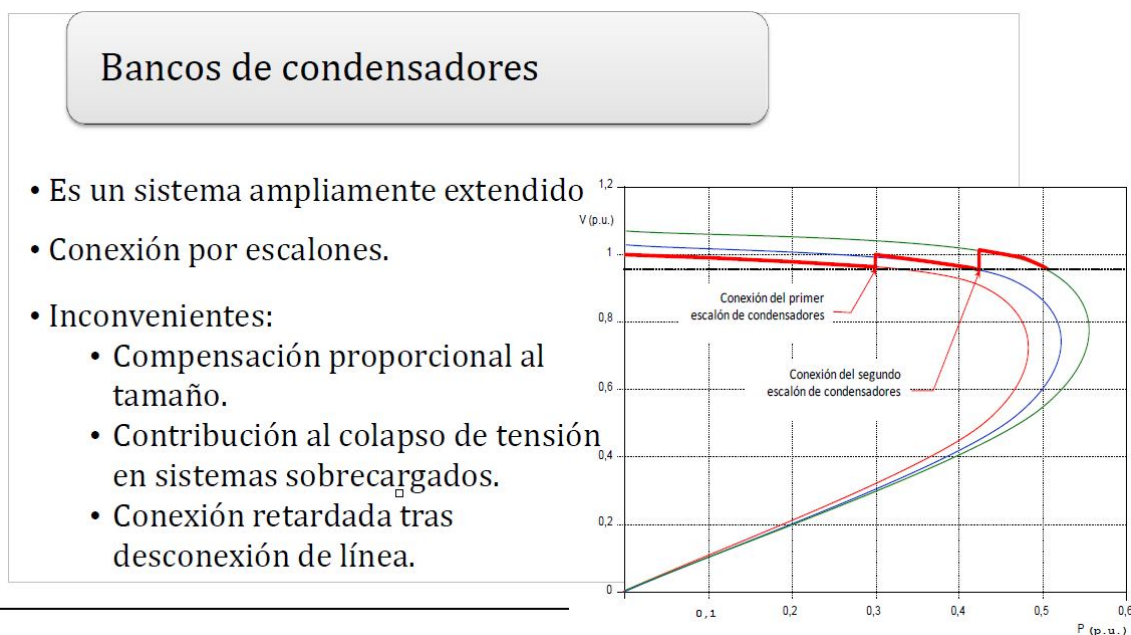


Figura 2.4 Efectos de la compensación de reactiva

Como se vio en el apartado anterior, la conexión del primer escalón puede dar lugar a sobretensiones y sobrecorrientes muy elevadas. Como se verá en este apartado la conexión del segundo escalón también da lugar a sobretensiones, habitualmente menores que las que se dan al conectar el primer escalón, y a sobrecorrientes, que pueden ser mayores que las que se producen en la conexión del primer escalón.

Para estudiar la conexión de la segunda etapa de la batería de condensadores se utiliza el circuito de la figura 2.5. Las autoinductancias de las baterías de condensadores L_1 y L_2 son opcionales y sirven para limitar las corrientes que absorbe la batería de condensadores, cuando éstas son muy elevadas.

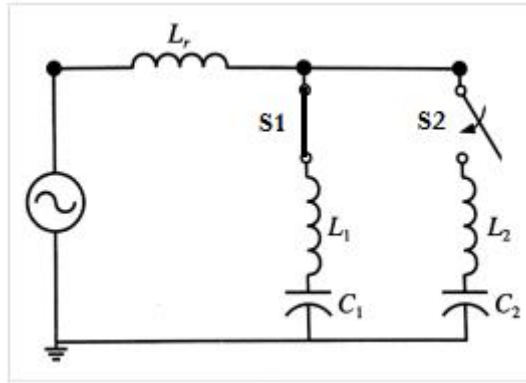


Figura 2.5 Esquema equivalente monofásico con dos baterías en paralelo

Los conductores de unión de los diferentes escalones con las barras de la subestación presentan una cierta inductancia, aunque muy reducida, al tratarse de conductores cortos, pero su consideración es fundamental para obtener resultados coherentes.

El estudio del régimen transitorio que tiene lugar al cerrar el interruptor S2 en el circuito de la figura 2.5 es muy complejo, ya que se tienen cinco elementos almacenadores de energía (tres bobinas y dos condensadores), lo que da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales que resulta en una ecuación diferencial del orden 5 con cinco condiciones de contorno dos sobre las tensiones en los condensadores y tres sobre las corrientes que circulan por las bobinas.

Cuando se estudia el circuito mediante un programa de simulación numérica (como se hará en el capítulo siguiente), se puede resolver el circuito sin cometer aproximaciones, pero cuando se estudia el circuito de la figura 2.5 de forma manual se suele recurrir a aceptar una serie de aproximaciones para obtener resultados relativamente válidos reduciendo considerablemente la dificultad del circuito a estudiar.

Así, el transitorio en estudio se divide en dos sub-transitorios.

En un primer sub-transitorio se supone que el condensador C_2 se carga a partir del condensador C_1 sin la intervención de la fuente (figura 2.6).

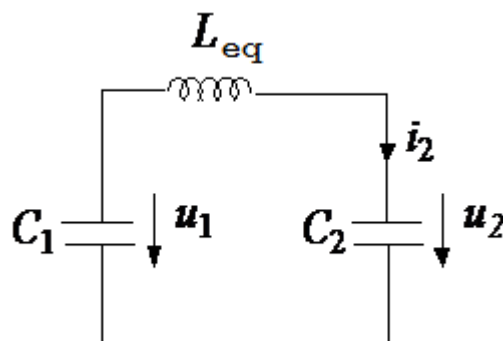


Figura 2.6 Primera parte del transitorio de la figura 2.5

Al final de este primer sub-transitorio los condensadores C_1 y C_2 quedan cargados a la misma tensión, que es una tensión inferior a la de la fuente.

En el segundo sub-transitorio se admite que las tensiones de ambos condensadores son idénticas (con lo que no circula corriente por la inductancia L_{eq} de la figura 2.6), y que los condensadores toman corriente de la fuente para cargarse al valor de dicha tensión (figura 2.7).

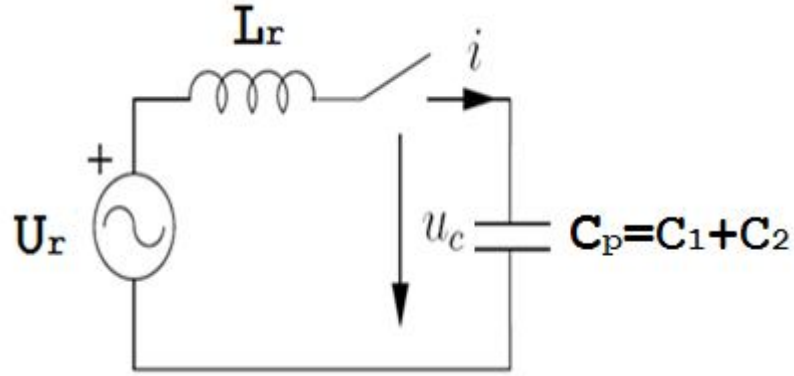


Figura 2.7 Segunda parte del transitorio de la figura 2.5

La división del transitorio de la figura 2.5, en la suma de los transitorios de las figuras 2.6 y 2.7 se basa en que las frecuencias naturales y las amortiguaciones de los circuitos de las figuras 2.6 y 2.7 son muy distintas, ya que la frecuencia natural es:

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_s}} \quad \text{Para el primer transitorio}$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_rC_p}} \quad \text{Para el segundo transitorio}$$

En el caso del circuito de la figura 2.6 la inductancia L_{eq} que interviene es una inductancia muy pequeña (por ser la inductancia de un conductor de unos pocos de metros de longitud) y la capacidad que interviene es la correspondiente a la disposición en serie de los condensadores C_1 y C_2 .

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (2.12)$$

$$C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.13)$$

Por el contrario en el caso del circuito de la figura 2,7 la inductancia que interviene es la inductancia L_r , que corresponde a una red más o menos extensa y la capacidad que interviene es la asociación en paralelo de los condensadores C_1 y C_2 .

$$C_p = C_1 + C_2 \quad (2.14)$$

Al ser $C_p > C_s$ y $L_r > L_{eq}$ resulta que la frecuencia natural $\omega_{01} > \omega_{02}$.

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_s}} \quad (2.15)$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_rC_p}} \quad (2.16)$$

Aunque en el capítulo 3 se analizará el circuito de la figura 2.5, presenta un cierto interés el comparar esa solución exacta con la solución aproximada que consiste en dividir el transitorio en dos sub-transitorios y por eso a continuación se mostrará cuál es la solución analítica a los dos sub-transitorios.

Primer sub-transitorio

Las ecuaciones del primer sub-transitorio (figura 2.6) son las siguientes:

$$\begin{cases} i_2 = C_2 \frac{du_2}{dt} \\ i_2 = -C_1 \frac{du_1}{dt} \\ u_1 - u_2 = L_{eq} \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (2.17)$$

Las condiciones de contorno que corresponden a este sub-transitorio son:

- La corriente que circula por la bobina L_{eq} en el instante inicial es nula.
- La tensión en el condensador C_2 es la tensión a la que se quedó cargado dicho condensador en la última desconexión, $u_2(0^+)$.
- La tensión en el condensador C_1 es aproximadamente igual a la tensión de la red en el momento en el que se da la orden de cierre al interruptor S2, $u_1(0^+)$.

Combinando las ecuaciones (2.17) se llega a

$$-\frac{i_2}{C_1} - \frac{i_2}{C_2} = L_{eq} \frac{d^2 i_2}{dt^2} \quad (2.18)$$

La solución de esta ecuación es:

$$i_2(t) = \frac{(u_1(0^+) - u_2(0^+))}{L_{eq}\omega_{01}} \text{sen}\omega_{01}t \quad (2.19)$$

Para obtener la evolución de la tensión hay que integrar la intensidad i_2 , por ejemplo para $u_2(t)$

$$u_2(t_1) = \frac{1}{C_2} \int i_2(t_1) dt \quad (2.20)$$

Integrando se llega a

$$u_2(t_1) = u_{c2}(0^+) - \frac{1}{Z_{02}\omega_{02}C_2} \Delta u(0^+) [1 - \cos\omega_{02}t_1] \quad (2.20 \text{ bis})$$

Donde

$$Z_{02}\omega_{02}C_2 = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_s}} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_s}} C_2 = \frac{C_2}{C_s} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (2.21)$$

Si se desprecian las resistencias en el circuito las tensiones e intensidades no alcanzarían jamás un régimen permanente. Sin embargo, en el caso real sí que se alcanza un régimen permanente cuando las tensiones de los dos condensadores son iguales y de valor:

$$u(\infty) = \frac{C_1 \cdot u_1(0^+) + C_2 \cdot u_2(0^+)}{C_1 + C_2} \quad (2.22)$$

La corriente cuando se igualan las tensiones de los dos condensadores es nula.

Segundo sub-transitorio

Las ecuaciones del segundo sub-transitorio (figura 2.7) son las siguientes:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_r = L_r \frac{di}{dt} + u_c \\ i = C_p \frac{du_c}{dt} \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

La solución de estas ecuaciones es

$$u_c(t) = \sqrt{2}U[\cos \omega t - \cos \omega_0 t] - u(\infty) \cos \omega_0 t \quad (2.24)$$

Donde ω_0 y $u(\infty)$ han sido definidas anteriormente.

Las figuras 2.8 a 2.15, ilustran los procesos transitorios que se originan con la conexión de la segunda batería de condensadores. Las figuras 2.8, 2.10, 2.12 y 2.14 corresponden al caso sin reactancias limitadoras, y 2.9, 2.11, 2.13 y 2.15 con reactancias limitadoras.

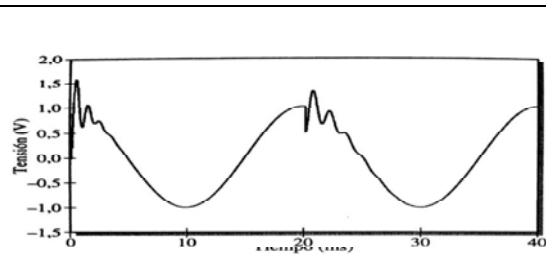


Figura 2.8 Tensión sin reactancia limitadora

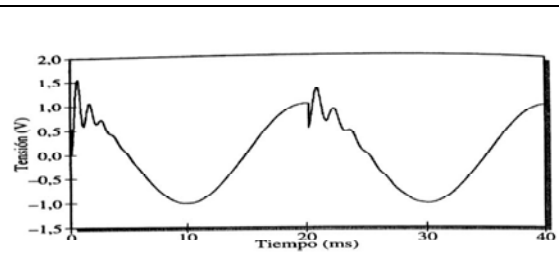


Figura 2.9 Tensión con reactancia limitadora

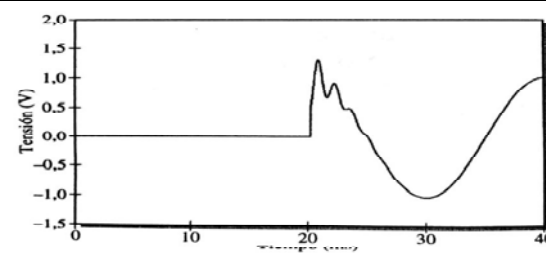


Figura 2.10 Tensión en segunda batería sin reactancia limitadora

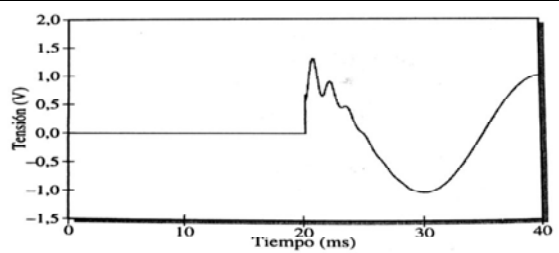


Figura 2.11 Tensión en segunda batería con reactancia limitadora

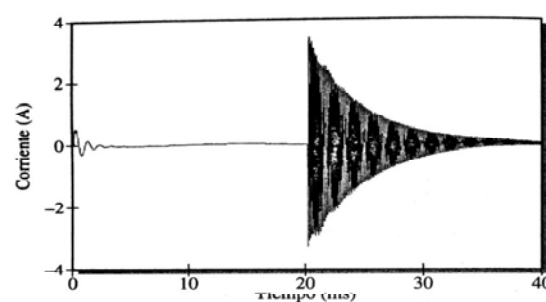


Figura 2.12 Corriente en la primera batería sin reactancia limitadora

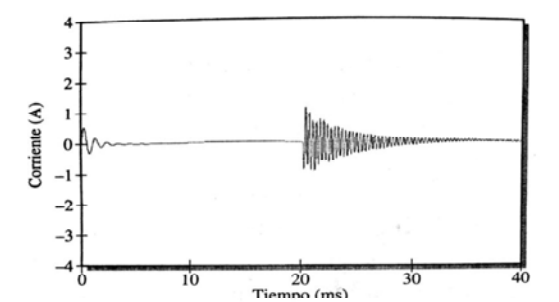


Figura 2.13 Corriente en la primera batería con reactancia

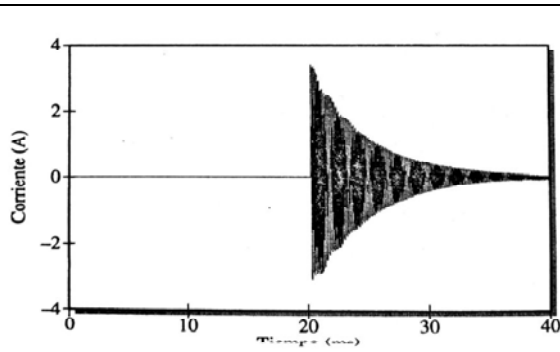


Figura 2.14 Corriente en la segunda batería sin reactancia limitadora

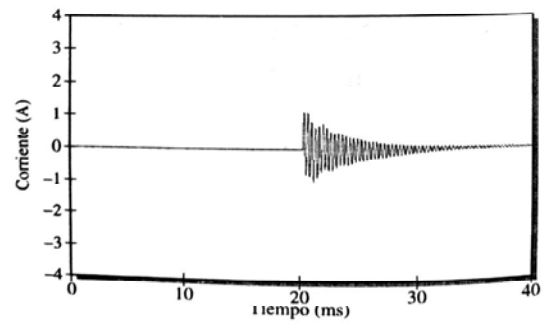


Figura 2.15 Corriente en la segunda batería con reactancia limitadora

A partir de los oscilogramas de las figuras se pueden apreciar que las sobretensiones en ambas baterías alcanzan un valor inferior al doble del valor de cresta de la fuente. Sin embargo los valores de sobreintensidades que se obtienen alcanzan valores muy elevados si no se instalan reactancias limitadoras en las baterías. También mencionar que el efecto de las reactancias es muy importante en las corrientes pero no en las tensiones.

2.3 Transitorio de desconexión de una batería de condensadores

La desconexión de una batería de condensadores puede dar lugar a sobretensiones y sobreintensidades que afectan gravemente al funcionamiento de los interruptores, llegando a causar fallos en los mismos. Esto es debido a que se producen transitorios muy rápidos, de 4 a 6 veces la frecuencia de la red, y dependiendo del momento en que se produzca pueden suponer un peligro para las instalaciones y el propio interruptor.

En este apartado vamos a elaborar un estudio de los parámetros y fenómenos que gobiernan el comportamiento de las corrientes y tensiones en la red, y que nos sirven para describir los transitorios que se producen en la desconexión de una batería de condensadores.

Para ilustrar el estudio del caso, la figura 2.16 muestra el circuito equivalente que usaremos para estudiar las sobretensiones que tienen lugar cuando desconectamos la batería de condensadores.

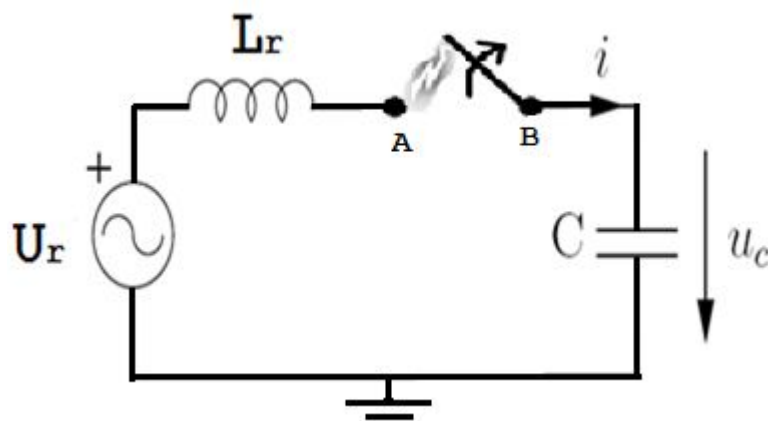


Figura 2.16 Desconexión de una batería de condensadores con cebado de arco.

La red de alimentación a la batería de condensadores la representaremos mediante su equivalente Thèvenin, mediante una fuente de tensión ideal de corriente alterna y una impedancia inductiva (se omite la resistencia puesto que se trata de una red inductiva). La batería de condensadores la consideraremos puramente capacitiva.

En el momento de apertura del interruptor y teniendo en cuenta que la tensión y la corriente están desfasadas 90° , el arco eléctrico que se forma en el inicio se extingue al primer paso por cero de la corriente. Este punto coincide con un máximo de tensión, quedando la batería cargada a la tensión máxima como se aprecia en la figura 2.17. Por tanto la tensión entre B y tierra coincide con la tensión del condensador y por tanto es constante.

Sin embargo, la tensión entre el punto A del circuito y tierra es iguala a la tensión de la fuente, ya que al no circular intensidad por el circuito la caída de tensión en la bobina es nula.

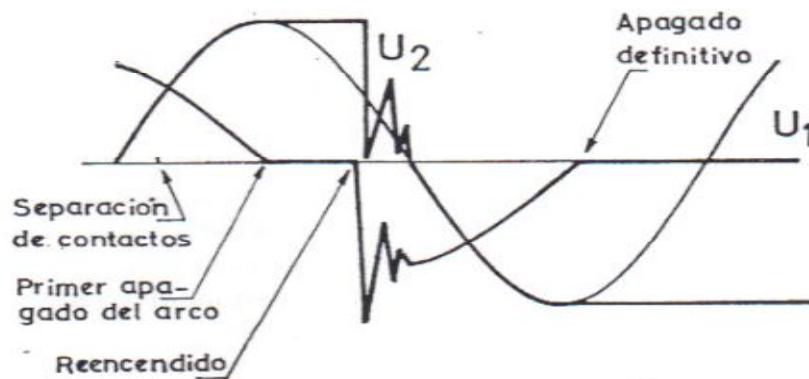


Figura 2.17 Recebados en la desconexión de una batería monofásica

La tensión entre contactos del interruptor, también llamada Tensión Transitoria de Restablecimiento, es la diferencia de potencial entre A y B. Esta tensión crece a partir de cero, pudiendo alcanzar valores muy elevados y superar la rigidez dieléctrica del medio en que se encuentran los contactos. Aunque la rigidez dieléctrica entre terminales del interruptor vaya aumentando debido a que el proceso de apertura mecánica continúa, la probabilidad de que se produzca un recebado es muy elevada. Si esto ocurre el proceso se repetirá, y la tensión en el condensador y la tensión transitoria de restablecimiento seguirán creciendo.

En la figura 2.18 se muestran las formas de onda de la tensión en el condensador y de la tensión de la fuente. Desde $t=0$ hasta $t=10$ ms circula intensidad por el circuito aunque se haya dado la orden de abrir el interruptor, ya que se establece un arco eléctrico entre contactos del mismo. La tensión en bornas del condensador es ligeramente mayor a la tensión de la fuente debido al efecto Ferranti. En $t=10$ ms la onda de intensidad pasa por cero y se extingue el arco eléctrico. Se aprecia como el condensador queda cargado en el momento de la desconexión y posteriormente, en $t=20$ ms la tensión entre los polos del interruptor supera la rigidez dieléctrica del medio y se reenciende el arco eléctrico cuando se extinga esa corriente de reencendido la batería queda cargada al valor de tensión en el que se produce el segundo corte. Esto mismo se verá mejor en la figura 2.19.

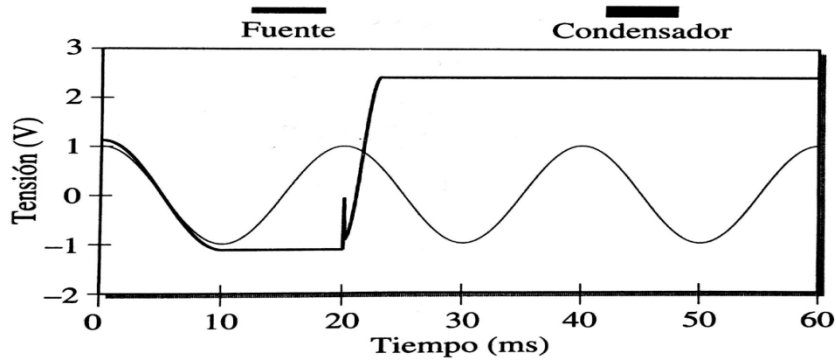


Figura 2.18 Tensión en el condensador y tensión de red

Las ecuaciones que describen los transitorios siguientes al cebado son:

$$u(t) = L_r \frac{di}{dt} + u_c \quad (2.25)$$

La corriente sigue la siguiente expresión:

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.26)$$

Las anteriores ecuaciones son las mismas que utilizamos en el apartado 2.1. En este caso la batería de condensadores tiene el valor de la tensión de red en el instante inicial.

Introduciendo la ecuación (2.26) en (2.15) obtenemos la ecuación en derivadas parciales de segundo orden:

$$u(t) = L_r C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c \quad (2.27)$$

Con la condición de contorno del problema, en este caso partimos de que la batería está cargada, unida a la condición de que en el circuito no puede haber una discontinuidad en la energía que fluctúa entre la inductancia y la capacidad, obtenemos la solución de la ecuación 2.27. (Crespo)

$$u(t) = \sqrt{2}U(2\cos \omega t - 1) \quad (2.28)$$

$$i(t) = 2\sqrt{2}U \sqrt{\frac{C}{L_r}} \sen \omega t \quad (2.29)$$

Siendo

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C}} \quad (2.30)$$

La pulsación propia del circuito, y U la tensión eficaz simple.

La tensión transitoria entre terminales del interruptor irá aumentando a medida que se vayan produciendo sucesivos recibidos, al igual que la tensión en el condensador.

En la figura 2.19 podemos apreciar como los sucesivos recibidos van aumentando la tensión en la batería de condensadores, llegando al valor final de U_2 , muy por encima del valor de la tensión de red.

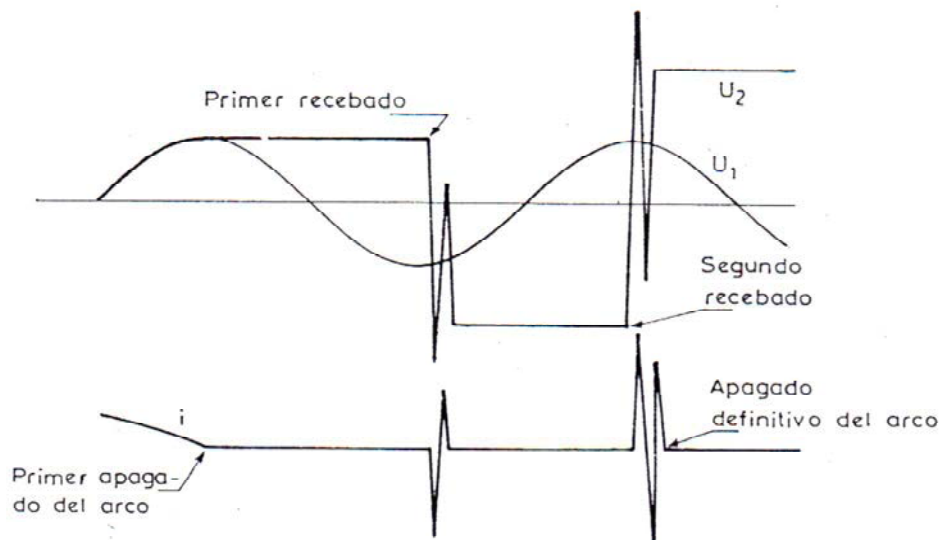


Figura 2.19 Recebados sucesivos en una batería de condensadores.

Si la apertura del interruptor no es suficientemente rápida y la carrera no tiene un valor suficiente, se puede dar el caso en que los sucesivos recibidos se den hasta agotar la carrera total, y al no poder aumentar la rigidez dieléctrica el arco producido ya no se extinga, resultando así en el deterioro del interruptor.

Estas sobretensiones de recibido se propagan por la red, y debido a las sucesivas reflexiones originan peligros potenciales para los aislantes. Estas sobretensiones tienen origen en las operaciones de desconexión de baterías de condensadores, que unidas al efecto Ferranti, aumentan la probabilidad de que el sistema se desestabilice.

En realidad los efectos de las sobretensiones son menores debido a que las baterías de condensadores llevan incorporados dispositivos de descarga, que permiten reducir la tensión que estás alcanzan, hasta valores seguros, por motivos de seguridad.

Por esta razón se exige que los interruptores de las baterías de condensadores estén exentos de recibidos, tal y como lo especifican las norma UNE-EN 60831-1:1998 [U831].

En la figura 2.16 se ha despreciado la capacidad parásita del lado de la red. Si tuviéramos en cuenta dicha capacidad parásita la tensión en el punto A y tierra oscilaría con una determinada frecuencia natural, como se muestra en la figura 2.20 (instantes desde $t=10$ ms a $t=20$ ms).

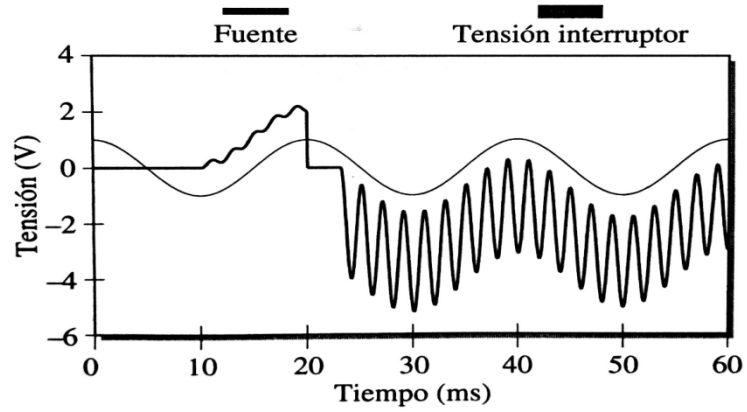


Figura 2.20 Tensión Transitoria de Restablecimiento y tensión de red

2.4 Baterías de condensadores trifásicas con neutro puesto a tierra.

Si en una red puesta a tierra los neutros de la red y de la batería están puestos a tierra de forma franca, cada fase se comporta con independencia de la fase adyacente, por lo que los transitorios son idénticos a los estudiados en apartados anteriores y más concretamente el caso 2.1 de conexión de baterías de condensadores en el que se utilizó el equivalente monofásico para cualquiera de las fases.

2.5 Baterías de condensadores trifásicas con neutro aislado.

En este apartado vamos a estudiar el caso de desconexión de una batería trifásica conectada en estrella con neutro aislado. Como es sabido, el arco eléctrico en el interior del interruptor se extingue en el paso por cero de la corriente, a partir de ese momento se puede considerar que el polo del interruptor está abierto. Si el neutro de la batería se encuentra aislado, veremos que el primer polo en abrir es el más solicitado, ya que la tensión transitoria de restablecimiento será mayor que en el caso de neutro a tierra.

Para ilustrar el estudio utilizaremos la figura 2.21 en el que se muestra el esquema eléctrico equivalente trifásico de la red.

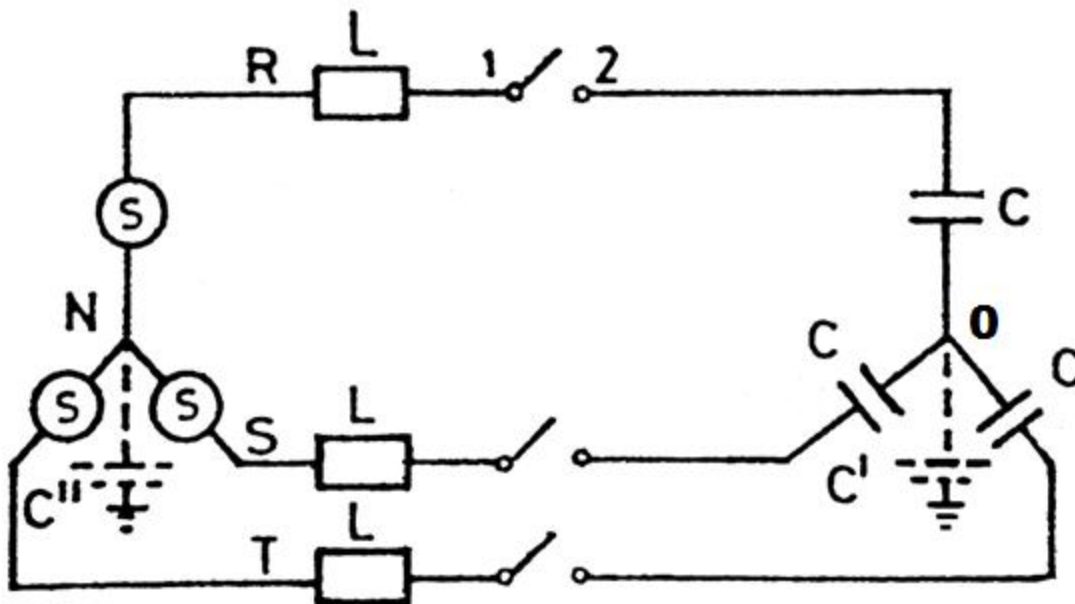


Figura 2.21 Batería trifásica con neutro aislado

En la figura 2.21 se ha representado el sistema eléctrico con su equivalente Thévenin trifásico, la fuente S y la inductancia L, en paralelo la batería de condensadores C, con conexión en estrella y su neutro aislado.

Al estar la batería aislada presenta una capacidad parásita C' , al igual que la capacidad parásita de la red C'' . Por lo general $C'' > C'$, ya que las líneas de transmisión serán más o menos largas, por lo tanto la tensión del punto neutro de la red no se verá casi afectada y se puede considerar que es el baricentro del triángulo de tensiones compuestas de la red. Esto, sin embargo, no ocurre en la batería de condensadores y por lo tanto habrá que tenerla en cuenta.

Si consideramos que el sistema es equilibrado y que la fase R es la que primero realiza la maniobra de desconexión, sabemos que la fase se abre al primer paso por cero y que al ser un sistema sin hilo de neutro, las corrientes de las fases S y T deben ser iguales y opuestas a partir del momento de la apertura, a excepción de la pequeña corriente que pase por C' .

Una vez abierta la fase R la tensión entre las líneas S y T se reparten por igual entre los dos condensadores en serie, con lo que la tensión en cada condensador es:

$$-\frac{1}{2} \cdot \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Y la tensión en el neutro de la batería de condensadores (respecto de la tensión del neutro de la red) será: (Crespo)

$$u_0 = \frac{U\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}(1 - \cos\omega_0 t) \quad (2.30)$$

Donde U es la tensión eficaz simple y ω_0 la pulsación propia del circuito, definidas en anteriores apartados.

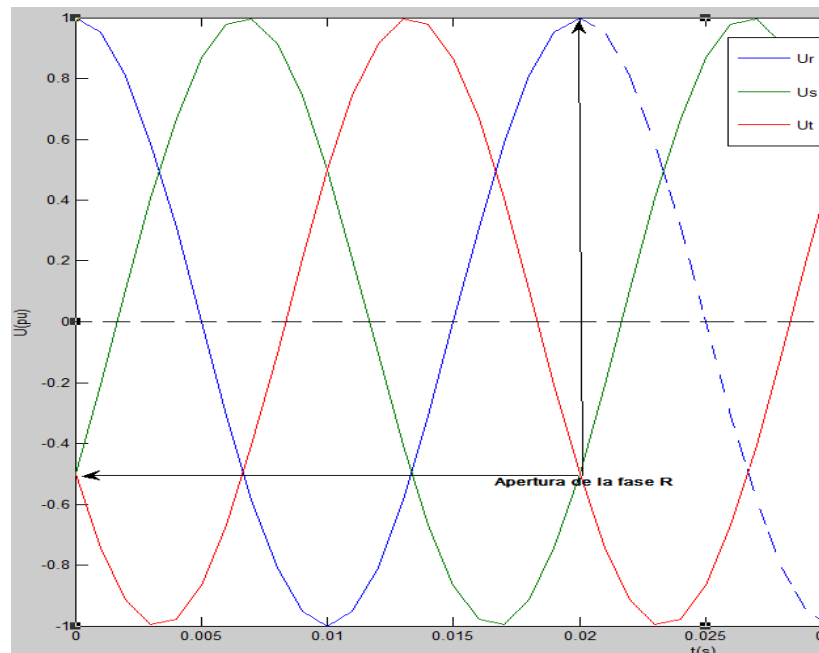


Figura 2.22 Tensión aplicada a los condensadores antes y después de la apertura del interruptor de la fase R

A partir del momento en que se abre el primer polo la tensión entre contactos del interruptor, puntos 1 y 2 de la figura 2.21, evoluciona de la siguiente forma:

$$u_{12} = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cos\omega_0 t - \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} - u_0 \quad (2.31)$$

Donde $\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ es la tensión con que queda cargado el condensador de la fase R y u_0 la tensión del punto neutro de la batería según la ecuación (2.30). Si introducimos la ecuación (2.30) en (2.31), obtenemos:

$$u_{12} = 1,5 \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (\cos\omega_0 t - 1) \quad (2.31 \text{ bis})$$

En la figura 2.23 podemos observar que la apertura del interruptor de la fase R se produce cuando la corriente pasa por cero, coincidiendo a la vez en que la tensión pasa por su máximo.

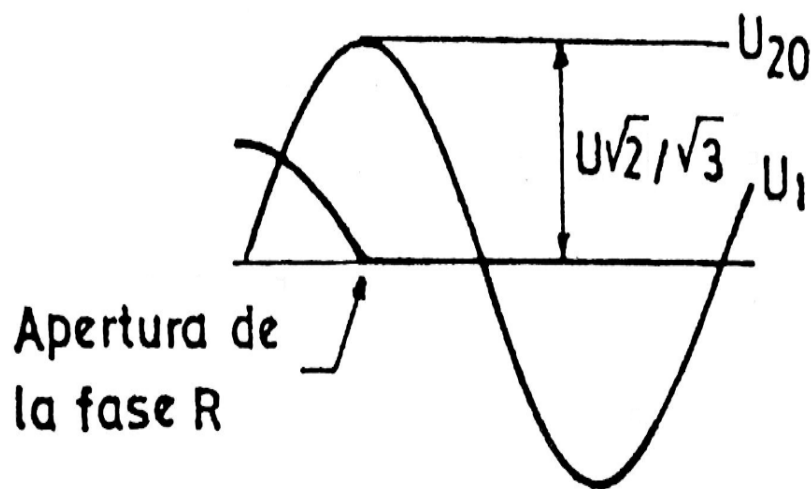
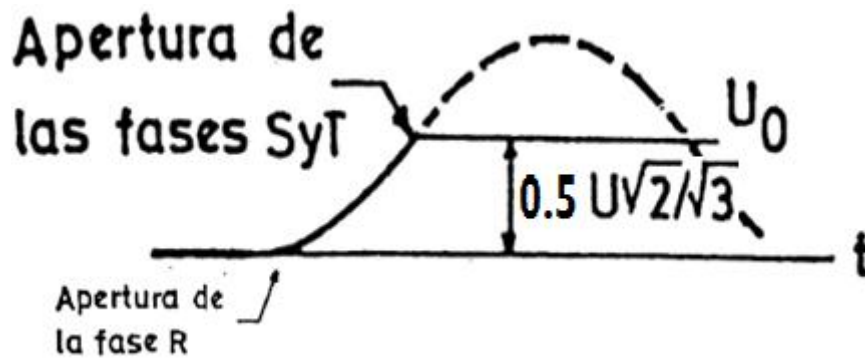


Figura 2.23 Tensión a la que se queda cargado el condensador de la fase R (tensión U_{20}) y tensión en la fase R de la red U_1 (punto 1 de la figura 2.21)

La tensión en el neutro de la batería crece a partir del momento en que la primera fase se abre, en la figura 2.24 podemos ver cómo, en el momento de apertura de S y T queda una tensión residual en el neutro de las baterías de condensadores de valor:

$$U_0 = 0.5 \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.32)$$

Figura 2.24 Tensión del neutro U_0

El punto en que en que las fases S y T quedan abiertas, es un punto igual a 5 ms, es decir, las fases S y T se abren simultáneamente en $t=25$ ms.

A partir de este momento la tensión entre contactos del polo R se comporta siguiendo la ley:

$$u'_{12} = -\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(\text{sen}\omega_0 t + 1,5) \quad (2.32)$$

Que se representa en línea continua en la figura 2.25.(Greenwood)

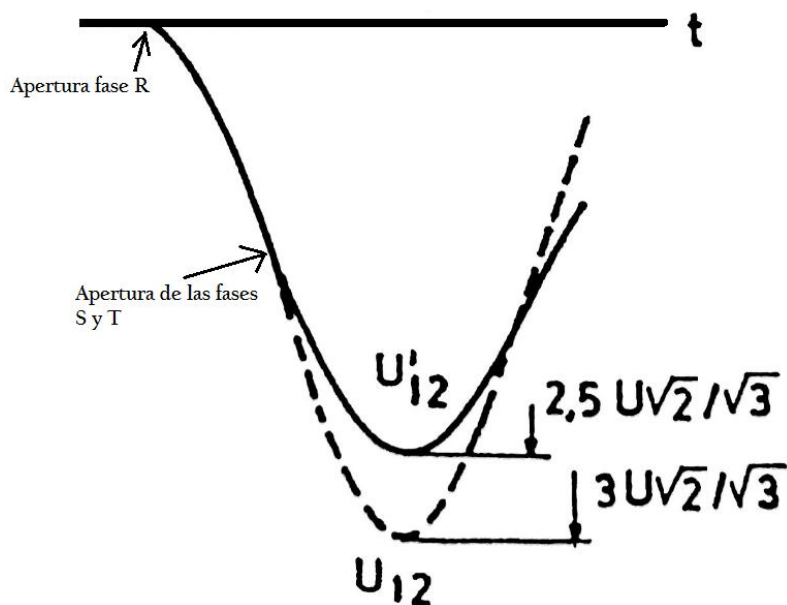


Figura 2.25 Tensión entre contactos con y sin apertura simultánea de las fases S y T, U'_{12} y U_{12} respectivamente

De la figura 2.25 vemos claramente que la tensión entre contactos de la fase R alcanza un valor máximo de 2,5 veces el valor de cresta simple a 10 ms de la apertura. Sin embargo existe un caso peor en el que se alcanza un máximo de 3 veces el valor de cresta simple, y se da cuando el tiempo de apertura de los contactos de los

interruptores es superior a 5 ms. Podemos apreciar en la figura 2.25 con línea discontinua la tensión de restablecimiento en el caso de que la dispersión en la apertura de los contactos sea insuficiente.

La normativa UNE-EN 60831-1:1996 junto con la UNE-EN 60831-1/A1:2003 define los ensayos correspondientes para interruptores destinados al corte de corrientes capacitivas para interruptores trifásicos, donde se especifica la tensión a aplicar sobre el primer interruptor en función de la dispersión entre los tiempos de la apertura de los polos del interruptor.[5], [6]

En baterías de condensadores con el neutro aislado de tierra, para mejorar el proceso de desconexión del primer polo, es frecuente que se conecte el neutro de la batería a tierra mediante un interruptor con dispositivo de enclavamiento, que impide abrir el primer polo si la batería no está conectada a tierra. Para volver a conectar la batería es preciso que el neutro esté desconectado de tierra. Sin embargo este procedimiento no es económicamente rentable ya que el ahorro que supone el coste menor de un interruptor de maniobra, se pierde con los mayores costes del interruptor del neutro y el sistema de señalización y enclavamiento reglamentarios.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE CASOS Y RESULTADOS

3.1 Simulación

En la actualidad y gracias a los avances que se han dado en el campo de la informática se han logrado trasladar los problemas de la vida real al mundo virtual por medio de una serie de técnicas que imitan o simulan los procesos reales. Este avance es de vital importancia para este trabajo de fin de grado, ya que gracias a la simulación por ordenador podemos comprobar la validez de los casos estudiados, ya que un estudio in situ de los casos estudiados tendría un coste muy elevado, sino insalvable, y sin garantías de resultados satisfactorios.

Los estudios en campo sirven para familiarizarse con los equipos de medida y control y con la instalación. Los estudios en campo precisan de una persona cualificada para realizar los ensayos y requieren que se respeten los protocolos de seguridad de obligatorio cumplimiento.

Las ventajas de realizar simulaciones son:

- ✓ Se pueden estudiar sistemas reales complejos y variables.
- ✓ Es posible comparar diferentes posibilidades de diseño.
- ✓ Mejor control sobre las condiciones experimentales.
- ✓ Es posible experimentar nuevos procedimientos sin alterar el sistema real.
- ✓ Se pueden probar fácilmente hipótesis sobre el origen de diversos fenómenos.
- ✓ Permite alcanzar un conocimiento profundo sobre las variables que más importan en el resultado, así como la forma de interactuar en el sistema.
- ✓ Se pueden manipular las condiciones de la simulación para desarrollar estudios que permitan mejorar el comportamiento futuro del sistema.

Las desventajas de realizar una simulación son:

- El desarrollo de modelos es lento y laborioso. Es complicado establecer cuando un modelo está completamente depurado y por tanto reproduce de forma exacta la realidad. También es complicado obtener datos de partida necesarios para la validación de los modelos.
- La fiabilidad de los resultados obtenidos es directamente proporcional a la fiabilidad de los modelos desarrollados.
- En ocasiones es complicado obtener el valor exacto de determinados parámetros, lo que obliga a realizar suposiciones e hipótesis.
- En procesos complicados puede resultar difícil interpretar los resultados obtenidos.
- Los modelos complejos exigen programas complejos de análisis de sistemas y elevado tiempo de cálculo.

- No se pueden validar los resultados de manera concluyente. Hay que hacerlos in situ.

En el presente capítulo realizaremos las simulaciones de los casos estudiados en el capítulo anterior.

Seguiremos el orden descrito en el capítulo 2 de cada caso para obtener los transitorios de tensión y corriente. Se representarán gráficamente los transitorios y se estudiará las principales variables que rigen los fenómenos.

3.2 Programa utilizado

Para realizar las simulaciones en este trabajo utilizaremos el programa:

MATLAB® Versión: 8.1.0.604 (R2013a) programa ampliamente conocido en el mundo de la ingeniería y las telecomunicaciones.

El subprograma perteneciente a Matlab® es el denominado:

Simulink® Versión: 8.1 (R2013a) que es un entorno de simulación basado en diagramas de bloques, muy útiles para el control de sistemas. Y en el que se pueden representar sistemas de diversa complejidad, además permite dibujar los modelos de circuitos que se estudian en el presente trabajo fin de grado.

Sym Power Systems. Es un conjunto de herramientas centradas en la modelización de sistemas eléctricos, esta herramienta se encuentra dentro de Simulink® y permite realizar los modelos de circuitos con sus diferentes elementos tales como fuentes de tensión DC y AC, líneas de parámetros distribuidos y concentrados, cargas dinámicas y estáticas, además de transformadores, bancos de condensadores, motores eléctricos y un sinnúmero de elementos de medida y control relacionadas con la Ingeniería Eléctrica.

Este conjunto de herramientas permite de manera sencilla para el usuario dibujar y comprobar sus modelos, ya que su interfaz gráfica es muy intuitiva. Sin embargo detrás existen todo un conjunto de algoritmos y reglas para resolver los sistemas.

En la mayoría de las simulaciones realizadas en este capítulo se utilizará el método de integración denominado por Matlab® ode23tb el cual es un método de bajo orden y que resuelve ecuaciones diferenciales rígidas, este método es una implementación de TR-BDF2 (Trapezoidal Rule-Second Order Backward Difference Formula), una fórmula implícita de Runge-Kutta con una primera etapa que es un paso regla trapezoidal y una segunda etapa que es una fórmula diferencial hacia atrás de orden dos. Por construcción, la misma matriz de iteración se utiliza en la evaluación de ambas etapas. [1], [2]

La razón por la que elegimos este método es porque a diferencia de otros, como la Trapezoidal Rule, Rosenbrock, Dormand-Prince ó Adams, este método es el más apto para el tipo de ecuaciones diferenciales que Simulink® debe resolver.

Los sistemas de ecuaciones diferenciales que resultan de los modelos que estudiaremos son problemas de valor inicial no lineales, por esta razón tenemos que utilizar un paso variable y aumentar la tolerancia relativa a $1 \cdot 10^{-4}$ para mejorar el tiempo computacional y la precisión respectivamente.

3.3 Planteamiento de casos

3.3.1 Transitorio de conexión de un condensador a la red.

El objetivo de la presente simulación es obtener la evolución de la tensión y de la corriente durante el transitorio de conexión de la batería trifásica de condensadores a la red con el neutro de la batería rígidamente puesto a tierra y con ello conocer los valores máximos de tensión y corriente que los elementos de la instalación (disyuntores, cables, seccionadores y batería de condensadores) deben soportar.

A continuación presentamos el modelo utilizado para la simulación.

Se trata de un circuito RLC mostrado en la figura 3.1. La tensión de la red trifásica es 45 kV de tensión de línea con neutro puesto a tierra, la potencia de cortocircuito de la red es de 2.500 MVA, por lo que se refiere a la resistencia de la red consideraremos que $X/R=14$. La capacidad de la batería de condensadores se tomará 5 MVar y está conectada en estrella con el neutro puesto a tierra.

Dado que la red es una red trifásica con el neutro puesto a tierra, las tensiones de cada una de las fases se pueden estudiar por separado, por tanto sólo estudiaremos una de las fases. Por lo visto en el capítulo 2, el peor transitorio se da cuando se acierta a conectar en transformador cuando la tensión de red pasa por su valor de cresta, de forma que la fase que elegiremos será aquella que tenga la mayor tensión en el instante de conexión.

En primer lugar obtendremos los parámetros del modelo

La inductancia interna de la red es:

$$L_r = \frac{X_r}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_L^2}{S_{cc}} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{45^2}{2500} = 2,6 \text{ mH}$$

Y la resistencia de la red: $R = \frac{X_r}{14} = \frac{U_L^2}{14 * S_{cc}} = \frac{45^2}{14 * 2500} = 58 \text{ m}\Omega$

La capacidad C de la batería de condensadores será:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{Q_c}{2\pi f U_L^2} = \frac{5}{2\pi 50 \cdot 45^2} = 7,86 \text{ }\mu\text{F}$$

La corriente nominal de la batería de condensadores es

$$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} U_L} = \frac{5.000.000}{\sqrt{3} \cdot 45.000} = 64,15 \text{ A}$$

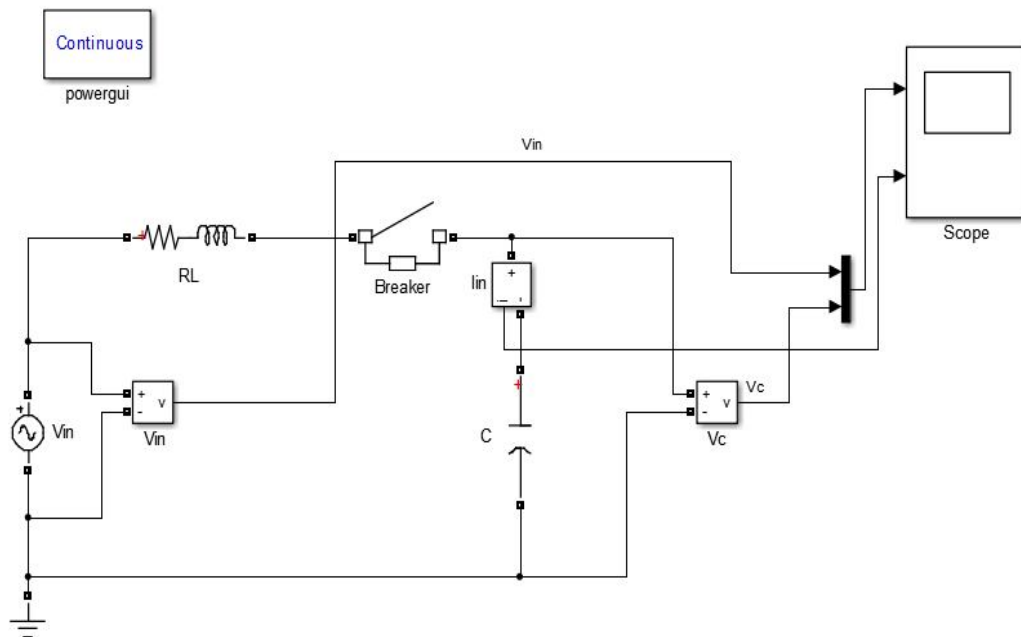


Figura 3.1 Modelo del circuito

En el circuito de la figura 3.1 hemos introducido los dispositivos de medida de magnitudes. Podemos observar que V_{in} mide la tensión de la red, V_c e I_{in} la tensión y la corriente en el condensador respectivamente.

El dispositivo utilizado para dibujar las tensiones y corrientes medidas, es el osciloscopio.

Como podemos apreciar en la figura 3.2, el interruptor se cierra en $t=5$ ms, a partir de ese momento se producen los transitorios de tensión y corriente los cuales son muy rápidos y están amortiguados, debido al efecto de la resistencia.

La tensión en bornas del condensador se muestra en la figura 3.2. En el caso que nos ocupa la tensión en el condensador puede alcanzar el valor de 73.000 V que es el doble de la tensión simple ($45 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 36.742$ V). Debido al bajo valor de la resistencia del sistema la tensión en el condensador sigue siendo elevada (50.000 V, como se puede ver en la figura 3.2) incluso después de 4 ciclos.

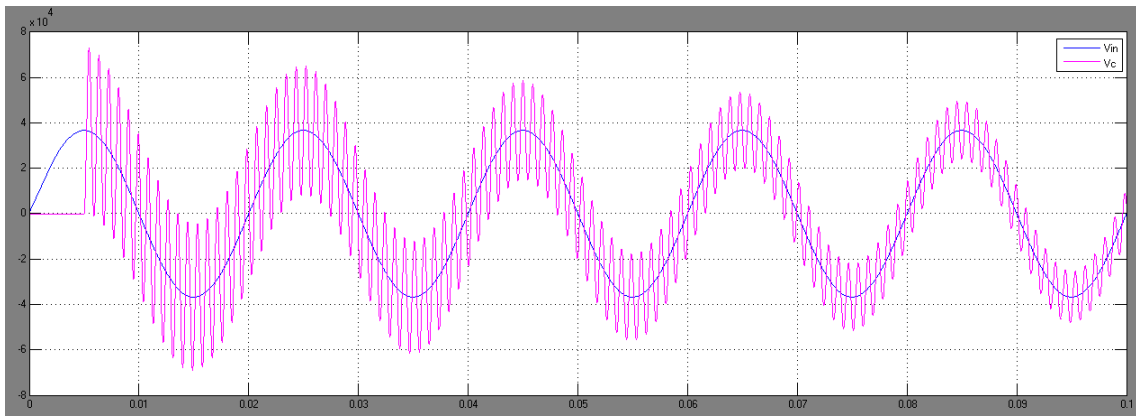


Figura 3.2 Tensión de red (onda azul) y tensión en el condensador (rosa) para una relación $X/R = 14$

Si utilizamos las ecuaciones obtenidas en el apartado 2.1, podremos comprobar que la simulación obtiene unos resultados bastante aproximados a los que se obtendría de forma analítica. Según la ecuación (2.8bis)

$$u_c(t) = \sqrt{2}U \cdot (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) \quad (2.8 \text{ bis})$$

Con lo que el valor máximo se dará en $t = \pi/\omega_0$ y valdrá

$$u_{cMax} = \sqrt{2}U \cdot (1 - (-1)) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{45.000}{\sqrt{3}} = 73.485 \text{ V} \quad (2.8 \text{ bis})$$

En las figuras 3.3. y 3.4 se muestran los resultados para el caso de que la resistencia sea el doble ($116 \text{ m}\Omega$) y el cuádruple ($232 \text{ m}\Omega$), en los que la tensión en el condensador en el primer ciclo es de 73.000 V y 72.500 V y al cabo de 4 ciclos la tensión cae a $4,2 \text{ kV}$ y $3,75 \text{ kV}$ respectivamente. Como se puede ver, el primer pico de tensión prácticamente no está influenciado por el valor de la resistencia del sistema (salvo que ésta alcance valores anormalmente elevados) y lo que sí que cambia es la duración del régimen transitorio.

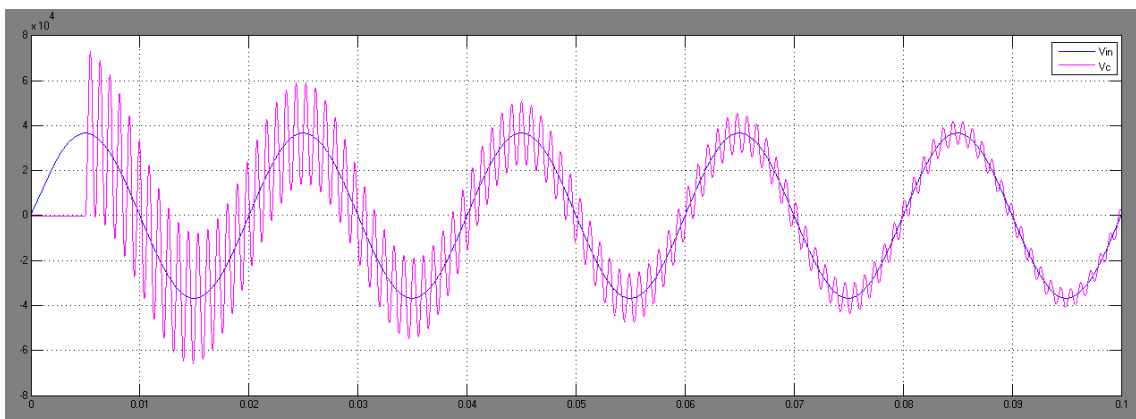


Figura 3.3 Tensión en el condensador para una relación $X/R = 7$

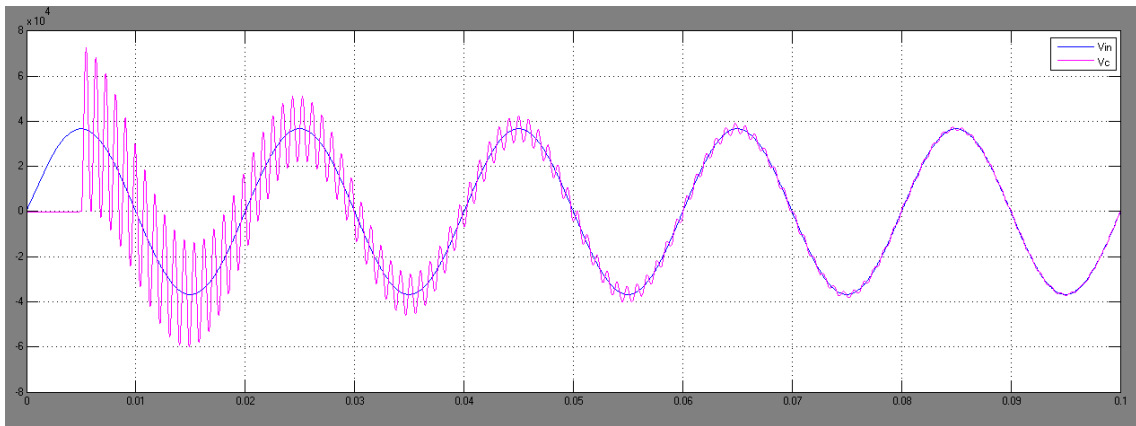


Figura 3.4. Tensión en el condensador para una relación $X/R=3,5$

En la figura 3.5 se muestra la corriente en la batería de condensadores durante el período transitorio. Se aprecia que el valor de cresta de la corriente es de 2.000 A. Compárese con el valor nominal de la corriente en la batería de condensadores que es 64 A. Como antes, este valor de cresta casi no varía al variar la resistencia del sistema para una potencia de cortocircuito dada, pero lo que sí que varía es la duración del transitorio, como se puede ver en la figura 3.6, realizada con una resistencia 4 veces mayor.

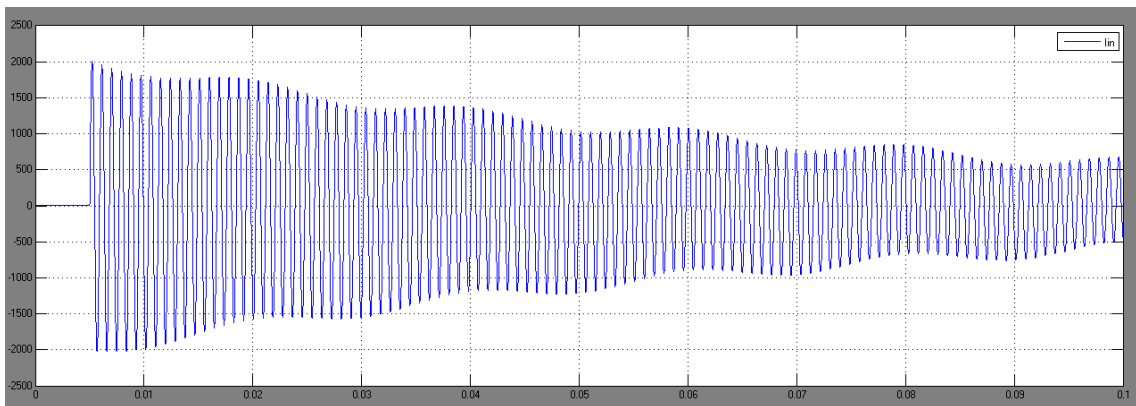


Figura 3.5 Corriente en el condensador para una potencia de cortocircuito elevada (2500 MVA) y una relación $X/R=14$.

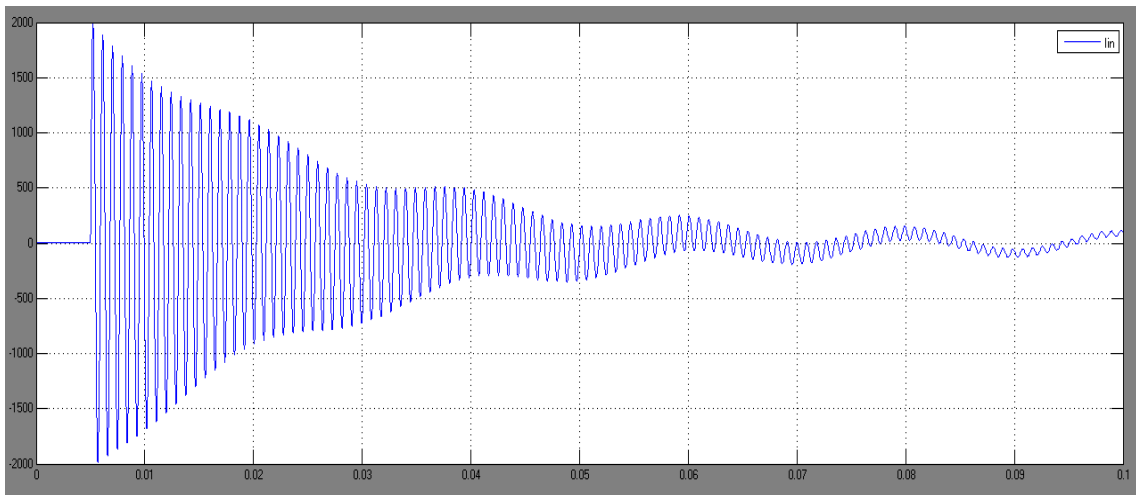


Figura 3.6 Corriente en el condensador para una potencia de cortocircuito elevada (2500 MVA) y una relación $X/R=3,5$.

También se puede analizar la influencia de la potencia de cortocircuito de la red a la cual el condensador se conecta. En el caso estudiado la tensión nominal de la red es 45.000 V. Típicamente la potencia de cortocircuito de dichas redes oscila entre un valor de 2.500 MVA para una red fuerte, 500 MVA para una red media y 100 MVA para una red débil.

En las figuras 3.7 y 3.8 se pueden ver la tensión y la corriente para el caso de una red de potencia de cortocircuito media con una relación $X/R=14$. El valor de cresta de la tensión no difiere sustancialmente del de las ocasiones anteriores (72.000 V). La frecuencia de las oscilaciones de tensión es mucho menor que antes, como predice la ecuación (2.9 bis). Para una relación $X/R=14$ la amortiguación sigue siendo muy reducida, como se deduce del hecho de que al cabo de 4 ciclos la tensión siga alcanzando valores de cresta de 50 kV.

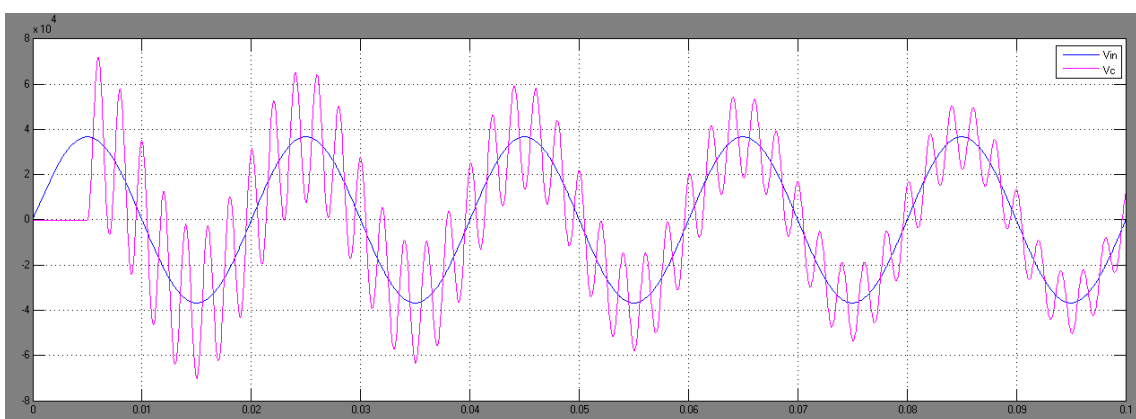


Figura 3.7 Tensión en el condensador para el caso de una potencia de cortocircuito media (500 MVA) con una relación $X/R=14$

El valor de la primera cresta de corriente se ve muy influenciado por la potencia de cortocircuito, pues pasa de los 2.000 A para el caso de una potencia de cortocircuito de 2.500 MVA a 900 A y 500 Hz en el caso de una potencia de cortocircuito de 500 MVA.

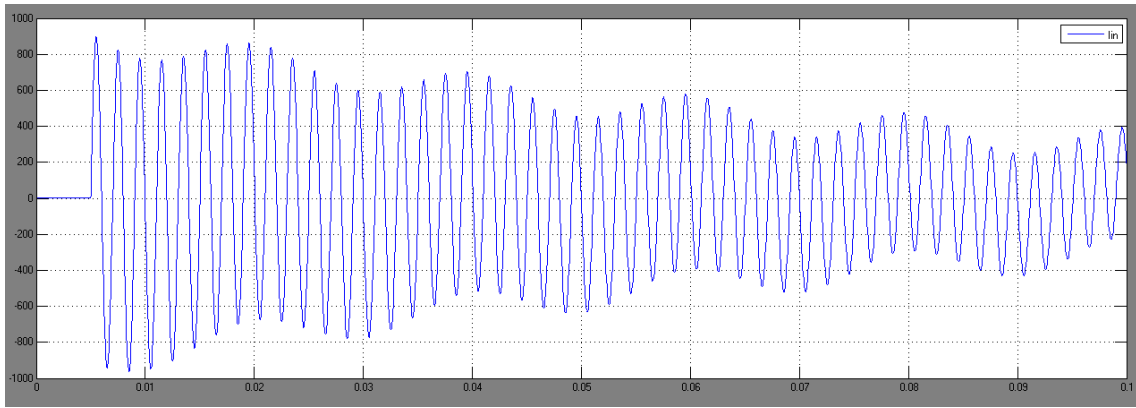


Figura 3.8 Intensidad en el condensador para el caso de una potencia de cortocircuito media (500 MVA) con una relación $X/R=14$

En las figuras 3.9 y 3.10 se pueden ver el caso de una red de potencia de cortocircuito reducida (100 MVA). En este caso se ha tomado una relación $X/R=3,5$, pues en este tipo de redes la componente resistiva es más acusada.

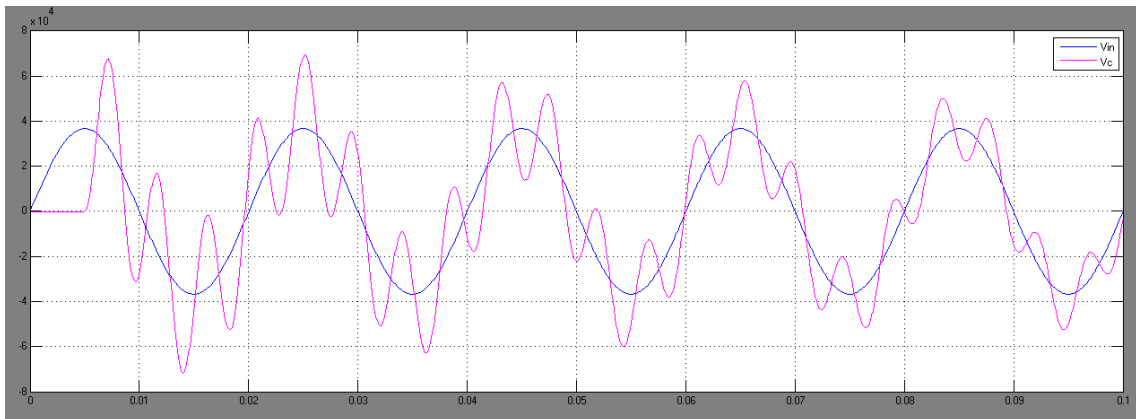


Figura 3.9 Tensión en el condensador para el caso de una potencia de cortocircuito baja (100 MVA) con una relación $X/R=3,5$

En este caso el valor de la primera cresta de tensión es 67.700 V, debido a la conjunción de una menor frecuencia de las oscilaciones con una mayor resistencia del sistema, que permite que el transitorio se amortigüe. También es de destacar que en este caso al cabo de cuatro ciclos el transitorio alcanza el valor de tensión de 50 kV. El transitorio no finalizó del todo, pues en la figura 3.10 se observa que la corriente todavía no es totalmente sinusoidal y además alcanza un valor pico de 493 A con una frecuencia de 222 Hz.

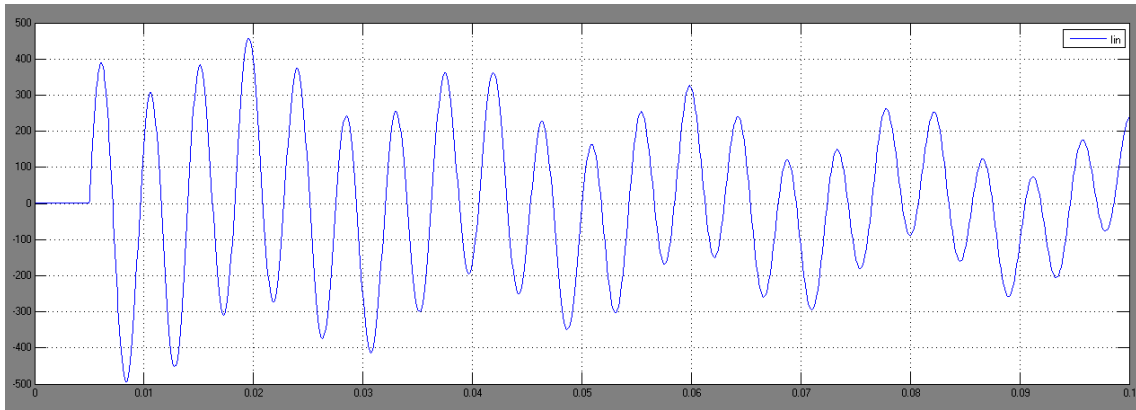


Figura 3.10 Intensidad en el condensador para el caso de una potencia de cortocircuito baja (100 MVA) con una relación $X/R=3,5$

Hasta ahora hemos supuesto que la batería de condensadores está descargada en el instante de la conexión, no obstante, en algunos casos puede ocurrir que el condensador tenga una cierta carga residual. A continuación se realizará la simulación suponiendo que la batería está inicialmente cargada. Para ello retomamos los valores de partida y supondremos que la batería de condensadores se encuentra cargada al valor de pico de la red pero con signo contrario en el momento de la conexión. La potencia de cortocircuito es 2.500 MVA, 45 kV tensión de línea y el valor de $X/R=14$ para la resistencia del sistema.

En la figura 3.11 se observa que el transitorio de la onda de tensión alcanza un valor pico de 108 kV, que es prácticamente el triple del valor pico de la tensión de red. El amortiguamiento del transitorio es muy bueno pues al cabo de 4 ciclos las sobretensiones son casi parecidas a la tensión de red.

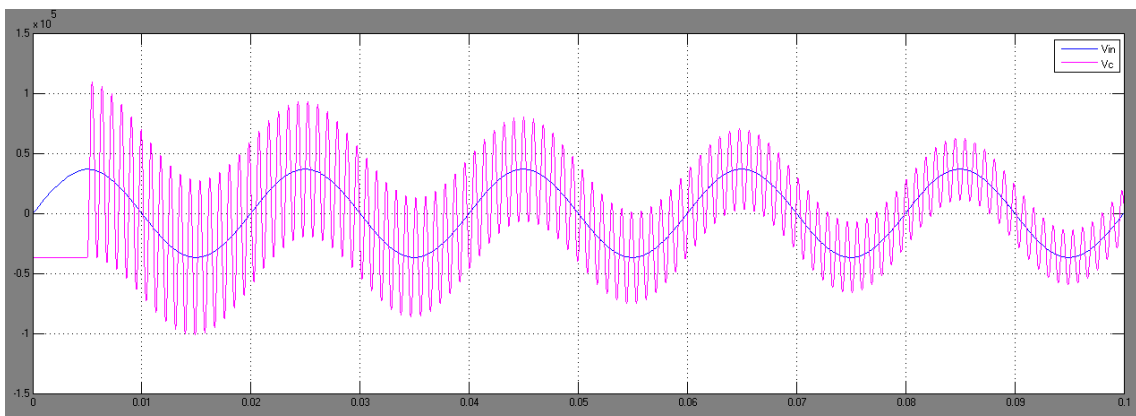


Figura 3.11 Tensión en el condensador (rosa) con carga inicial, y tensión de red (azul)

Se observa que desde $t=0$ hasta $t=5$ ms, la batería tiene una carga inicial igual al valor de pico de la tensión pero con signo cambiado. Cuando se conecta la batería en $t=5$ ms se produce el transitorio muy rápido con una frecuencia de 1.100 Hz, la duración del transitorio en este caso es menor, en comparación con el caso inicial (ver figura 3.1).

En comparación con el caso en que la batería está inicialmente descargada es evidente que la batería de condensadores se encuentra más solicitada, puesto que el valor de pico que alcanza la sobretensión es de 110.000 V, este valor es 3 veces la tensión de cresta de la red. Este hecho pone de relieve la necesidad de controlar el momento en que la batería se conecta a la red ya que supone un serio riesgo para las instalaciones. No obstante el controlar el valor de esta tensión requiere o bien utilizar interruptores electrónicos de estado sólido o bien ensayar previamente el interruptor automático convencional para conocer de forma precisa el tiempo que media entre que el interruptor recibe la orden de cerrar y el instante en el cual se cierra efectivamente el circuito.

En la figura 3.12 se puede ver claramente la influencia que tiene en la corriente que ha de soportar la batería de condensadores. En este caso se observa un valor pico de 4.000 A mientras que si la batería de condensadores estuviera descargada soportaría 2.000 A. Por lo tanto aquí tenemos un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de conectar las baterías pues la diferencia entre soportar 2.000 ó 4.000 Amperios puede suponer un mayor desembolso económico en la aparamenta de maniobra.

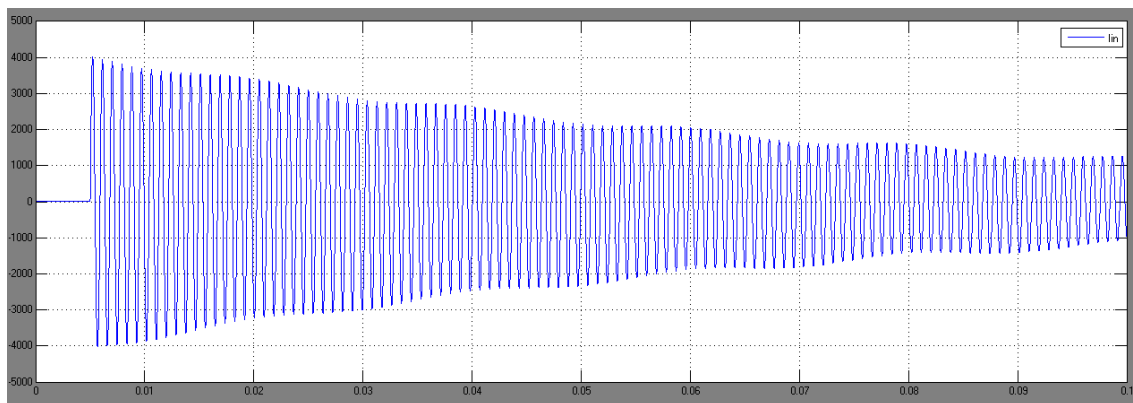


Figura 3.12 Corriente en la batería de condensadores en caso de que se conecte a la red un condensador previamente cargado.

3.3.2 Transitorio de conexión de una batería de condensadores de dos escalones

En este apartado se simula el comportamiento de una batería de condensadores de dos escalones, es decir, simularemos la conexión de la primera batería de condensadores y a continuación la segunda. En este apartado vamos a incluir una inductancia entre condensadores para limitar la corriente absorbida por los condensadores.

Como ya vimos en el apartado 2.2, cuando tenemos una instalación con compensación de reactiva, lo más rentable y seguro es tener una batería que se conecte por escalones, especialmente en aquellos casos en los que la demanda de reactiva puede ser muy variable en el tiempo.

En éste apartado vamos a modelar un circuito equivalente monofásico de una batería de condensadores conectada en estrella, frecuencia 50 Hz, cuyos datos de entrada serán:

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión de red de línea	U_r	3	kV
Potencia de cortocircuito de la red	S_{cc}	9	MVA
Potencia reactiva del condensador 1	Q_1	400	kVAr
Potencia reactiva del condensador 2	Q_2	50	kVAr
Inductancia entre condensadores	L_1	20	μH

Tabla 3.1: Datos del caso simulado

Con los datos de la tabla 3.1. Calculamos la inductancia de la red:

$$X_{cc} = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{(3000)^2}{9 \cdot 10^6} = 1 \Omega ; \quad L = \frac{X_{cc}}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi f} = 3.2 \text{ mH}$$

Para determinar la resistencia de la red se usa la relación $X/R=3.5$:

$$R = \frac{X_r}{3.5} = \frac{U_L^2}{3.5 * S_{cc}} = \frac{3^2}{3.5 * 9} = 0.28 \Omega$$

La capacidad de cada una de las baterías será:

$$C_1 = \frac{Q_1}{\omega U^2} = \frac{400 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 50 \cdot (3000)^2} = 141.47 \mu F$$

$$C_2 = \frac{Q_2}{\omega U^2} = \frac{50 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 50 \cdot (3000)^2} = 17.68 \mu F$$

Con los datos de inicio calculados, presentamos a continuación el modelo del circuito a estudiar en la figura 3.13:

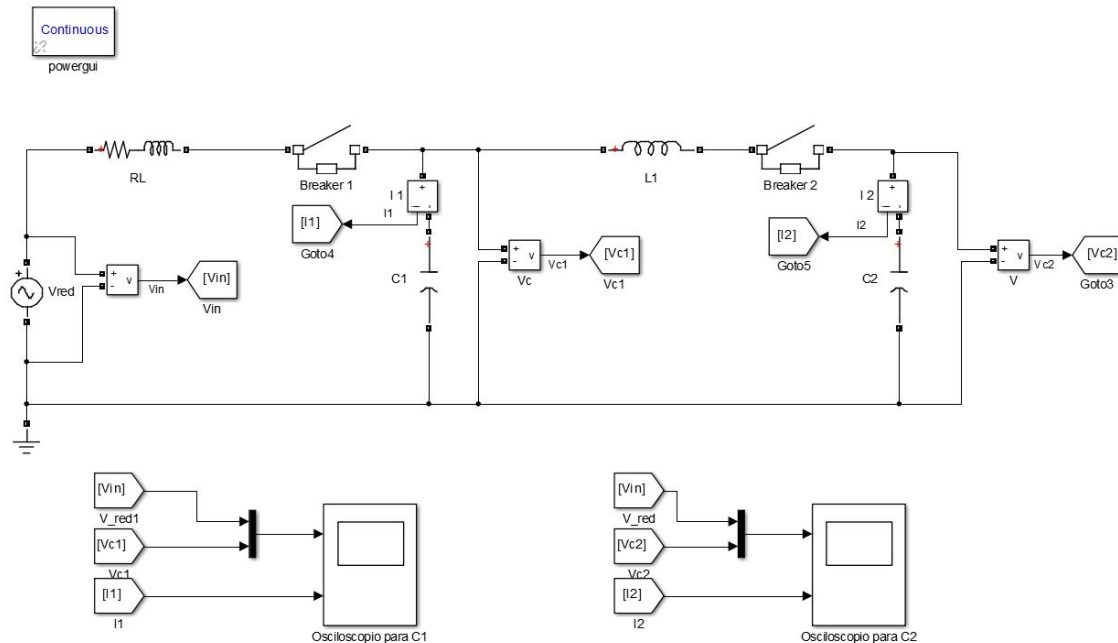


Figura 3.13 Banco de condensadores de dos escalones

Como se puede observar en la figura 3.13 representamos el equivalente Thèvenin del sistema eléctrico, en este caso modelado como la fuente de tensión alterna en serie con la impedancia RL . A continuación presentamos el interruptor (Breaker 1), el condensador C_1 , y en paralelo la inductancia L_1 , el interruptor 2, y el condensador C_2 .

Los dispositivos de medida son: V_{in} que mide la tensión de la red, I_1 mide la corriente que circula por el condensador 1, V_{c1} la tensión en el condensador 1, I_2 mide la corriente que circula por el condensador 2, V_{c2} mide la tensión en el banco 2. Los dispositivos para representar las magnitudes medidas son 2 osciloscopios, el primero para las magnitudes del primer banco C_1 y el segundo para el banco C_2 , tal y como se aprecia en la figura 3.13.

Como hemos visto en el apartado 2.2 es necesario que la tensión en el condensador 1 se estabilice antes de conectar la segunda batería, de lo contrario la corriente absorbida por la segunda batería sería muy elevada, poniendo en peligro la instalación. Por ello se han configurado los interruptores para que la segunda batería de condensadores se conecte cuando la tensión en el primer condensador sea parecida a la tensión de la red.

En nuestro caso el tiempo total de simulación es de 100 ms, el interruptor 1 está configurado para que se cierre en $t = 5\text{ms}$ que coincide con un máximo en la onda de tensión de la red. Cuando la tensión en el condensador 1 sea parecida a la de la red, se activa el segundo interruptor, en este caso también en el primer máximo de tensión. Ambos condensadores se admiten descargados en el momento de cierre de los respectivos interruptores.

En la figura 3.14 se muestra la evolución de la tensión y de la corriente en bornas del primer escalón de la batería de condensadores C_1 .

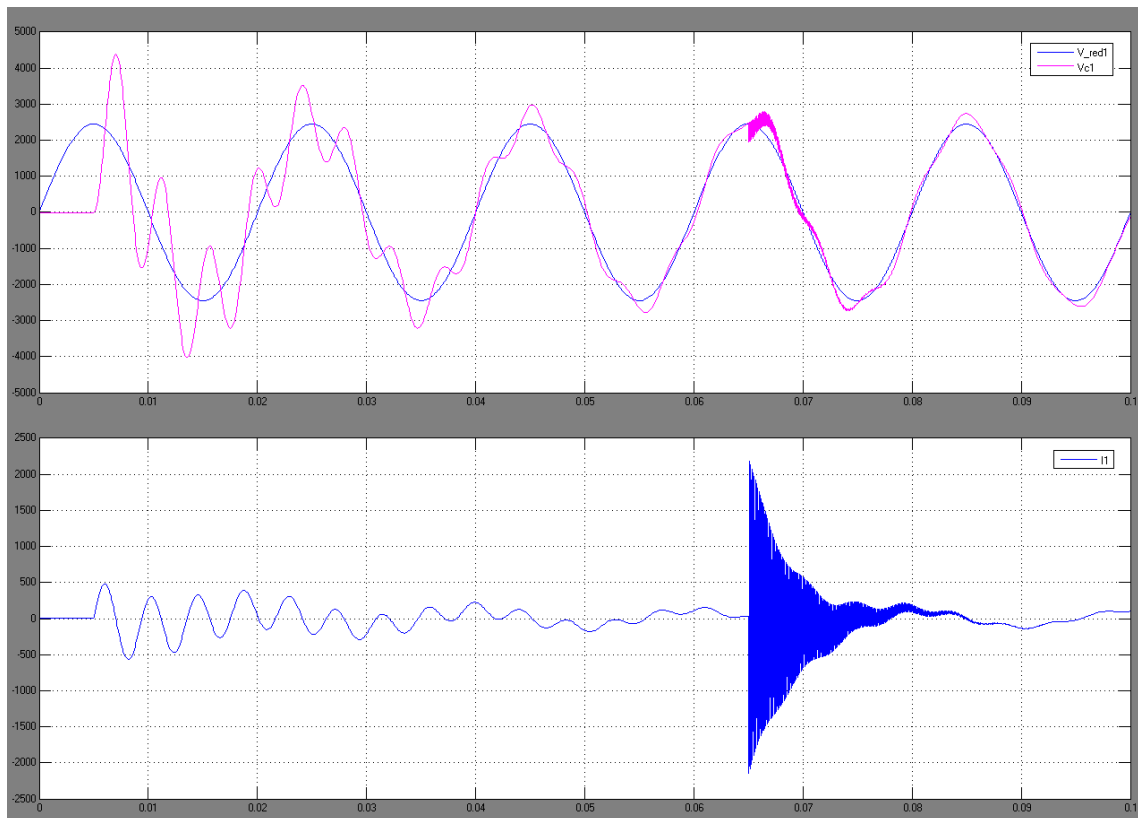


Figura 3.14 Medidas en el condensador C_1 : Tensión de red (azul) y tensión del primer escalón de baterías (rosa) en la parte superior. Y corriente absorbida (azul) en la parte inferior.

Podemos ver en la figura 3.14 como en $t=5$ ms, el primer transitorio de tensión se comporta de forma esperada y similar al estudiado en el apartado 3.3.1, y su valor se acerca al doble de la tensión de red $2 \cdot 3.000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4.899 \text{ V}$ alcanzando un valor pico de 4.400 voltios y frecuencia 235 Hz, que prácticamente coincide con la frecuencia natural calculada.

$$f_0 = f \cdot \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot 10^6}{400 \cdot 10^3}} = 237 \text{ Hz} \quad (2.9 \text{ bis})$$

En realidad es un poco difícil medir con precisión los tiempos en los oscilogramas la frecuencia de las oscilaciones, de ahí la diferencia entre la frecuencia calculada y la frecuencia medida.

La conexión del segundo escalón se produce en $t=65$ ms. Se observa que la sobretensión en el segundo transitorio es mucho menor al del primer transitorio, se ve que la batería está menos solicitada ya que la tensión pico que alcanza es de 2.800 voltios y la frecuencia natural de este segundo transitorio es de 10.000 Hz.

Esta frecuencia natural es relativamente parecida a la obtenida en el apartado 2.2 al analizar teóricamente el problema (dividiendo el transitorio en dos subtransitorios) en los que llegamos a una frecuencia de:

$$\omega_{01} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_s}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 15,71 \cdot 10^{-6}}} = 8.979 \text{ Hz}$$

Con

$$L_{eq} = L_1 + L_2 = 20 \mu H \quad (2.12)$$

$$C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{141,47 \cdot 17,68}{141,47 + 17,68} = 15,71 \mu F \quad (2.13)$$

Esta frecuencia es razonablemente semejante a la obtenida mediante simulación (10.000 Hz), teniendo en cuenta que la frecuencia ω_{01} anterior ha sido obtenida a través de simplificaciones.

Así como el transitorio de tensión es más problemático en la conexión del primer escalón de la batería de condensadores, el transitorio de corriente es más problemático en la conexión de la segunda batería de condensadores. En $t=5$ ms el primer pico de corriente transitoria que absorbe el condensador C_1 en la primera parte del transitorio es de 500 Amperios de valor pico y frecuencia 200 Hz. Sin embargo vemos como en $t=65$ ms, cuando se conecta el segundo escalón, el transitorio de corriente supera ampliamente los valores del primer transitorio con valores que alcanzan los 2.180 Amperios pico en el primer semiciclo y una frecuencia de 10.000 Hz.

El estudio teórico que se realizó en el apartado 2.2, dividiendo el transitorio en dos subtransitorios, condujo a la ecuación.

$$i_2(t) = \frac{(u_1(0^+) - u_2(0^+))}{L_{eq}\omega_{01}} \text{sen}\omega_{01}t \quad (2.19)$$

Al sustituir en la expresión de $i_2(t_1)$, obtenemos la amplitud del pico de corriente:

$$I_2 = \frac{\left(3.000\sqrt{\frac{2}{3}} - 0\right)}{20 \cdot 10^{-6} * \sqrt{\frac{1}{20 \cdot 10^{-6} * 15,71 \cdot 10^{-6}}}} = 2.170 \text{ A}$$

Vemos que la corriente obtenida por simulación se parece bastante de la obtenida de forma teórica. Esta similitud entre los resultados avala el tratamiento teórico dado al

problema en el apartado 2.2, en el que el transitorio se dividió en dos subtransitorios para su estudio.

En la figura 3.15 podemos observar los transitorios que se producen en la segunda batería de condensadores C_2 .

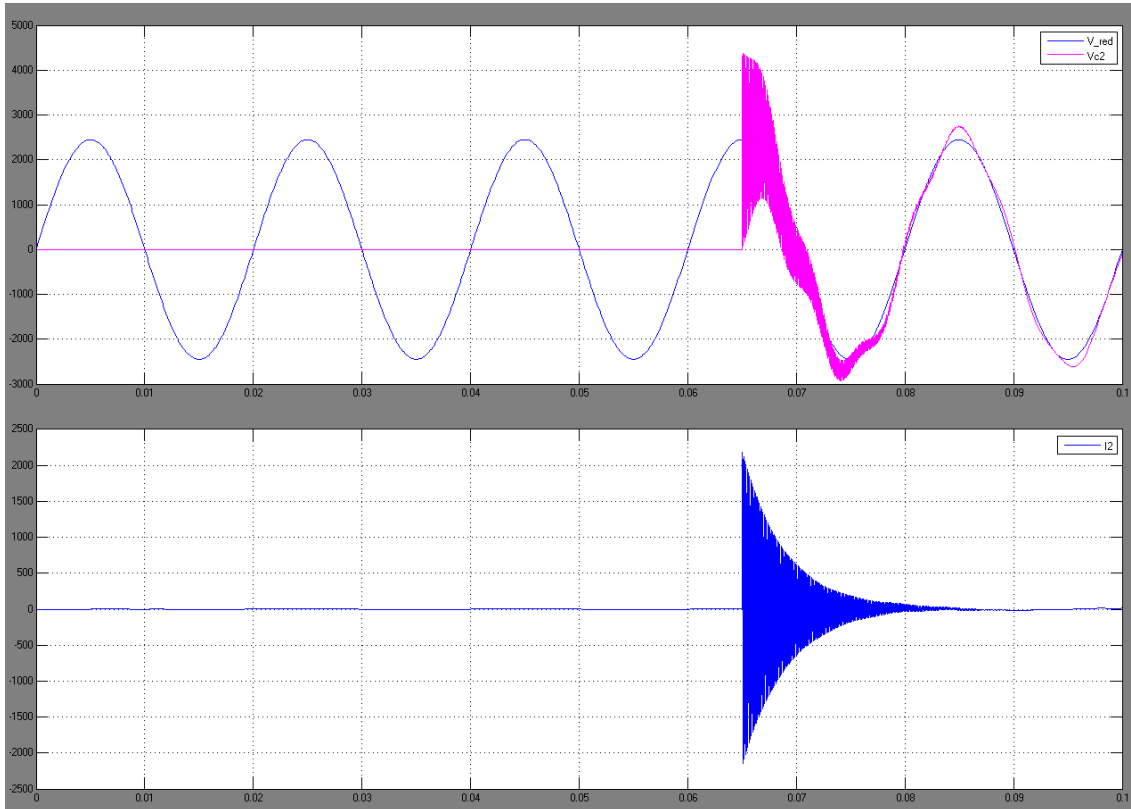


Figura 3.15 Medidas en condensador 2: Tensión de red (azul) y tensión del segundo escalón de baterías (rosa) en la parte superior. Y corriente absorbida (azul) en la parte inferior.

Desde $t=0$ hasta el instante $t=65$ ms el segundo escalón está desconectado, en el instante $t=65$ ms se comprueba que la tensión en el primer escalón es parecida a la tensión de red y se conecta la segunda batería de condensadores. En la figura 3.14 se observa que el transitorio de tensión en C_1 aún no ha finalizado, sin embargo consideramos que el sistema está suficientemente amortiguado como para suponer que en $t=65$ ms la tensión en el primer banco de condensadores y la tensión de red son las mismas.

La sobretensión que se produce en la batería de condensadores C_2 , en el instante de conexión, es mucho mayor que en la batería de condensadores C_1 , ya que mientras en C_1 se alcanza un valor pico de 2.800 voltios, en C_2 se alcanzan los 4.300 voltios pico, y una frecuencia de 10 kHz para ambos casos. Se observa que la sobretensión en C_2 es casi el doble de la tensión en C_1 en el instante de la conexión, por tanto se podría decir que se parece al caso 3.3.1 en el que se conecta la batería con una carga residual inicial.

En la figura 3.15 se aprecia la sobreintensidad absorbida por la segunda batería de condensadores que alcanza los 2.200 Amperios pico en el primer semiciclo y una

frecuencia de 10 kHz, la duración del transitorio es muy breve pues desde la conexión en $t=65$ ms hasta $t=93$ ms el transitorio ha finalizado. En comparación con la corriente absorbida en el primer escalón C_1 este valor es el mismo pues es la corriente que circula por el circuito CLC si no consideramos la fuente.

Hasta ahora hemos estudiado el caso en que las baterías de condensadores se encuentran inicialmente descargadas, sin embargo hay un caso que es aún peor y es cuando la segunda batería de condensadores está inicialmente cargada.

Para iniciar la simulación fijamos el valor inicial del condensador 2 al mismo valor de tensión de cresta de la red pero con signo cambiado, esto es:

$$U_{C2}(t = 0 \rightarrow t = 65 \text{ ms}) = -3 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ kV}.$$

En la figura 3.16 se puede apreciar que el valor de carga inicial del condensador 2 es constante desde $t=0$ hasta el instante de conexión en $t=65$ ms, en este caso, al contrario de lo que pasa en el caso inicial de estudio, la sobretensión en la segunda batería de condensadores si representa un problema mayor. Se observa que la tensión en la batería C_2 alcanza un valor pico de 6.250 Voltios, más del doble si la batería C_2 estuviera descargada inicialmente. También se observa que el transitorio es muy rápido igualando a la tensión de la red al cabo de 25 ms. En cuanto al comportamiento de la corriente se observa que el valor de corriente que absorbe la batería de condensadores es de 4.300 Amperios, que en comparación con la batería C_2 inicialmente descargada, es el doble.

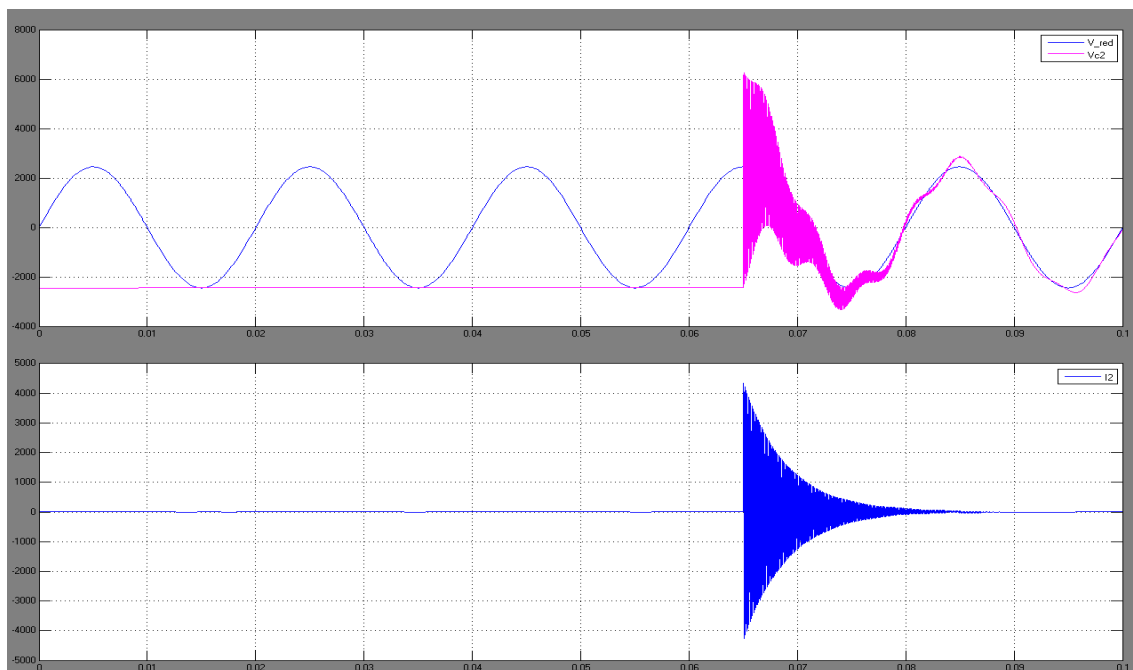


Figura 3.16 Medidas en condensador 2: Tensión de red (azul) y tensión del segundo escalón de baterías (rosa) en la parte superior. Y corriente absorbida (azul) en la parte inferior.

Tal y como se estudio en el apartado 2.2 los valores presentados en las simulaciones son el resultado de casos en los que se han modificado las condiciones para que el sistema responda ante los peores casos (conexión de las baterías de condensadores cuando la tensión de red pasa por un máximo). En los sistemas reales no siempre la conexión de las baterías de condensadores se hace cuando la tensión fundamental pasa por un máximo. Si se cambia el instante de conexión a cualquiera que no sea un máximo de la tensión fundamental se comprueba que los transitorios de tensión y corriente son menores, aunque no menos importantes.

A continuación en las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se muestra la influencia del instante de conexión del primer escalón de la batería en el transitorio de tensión que se alcanza en el condensador C_1 .

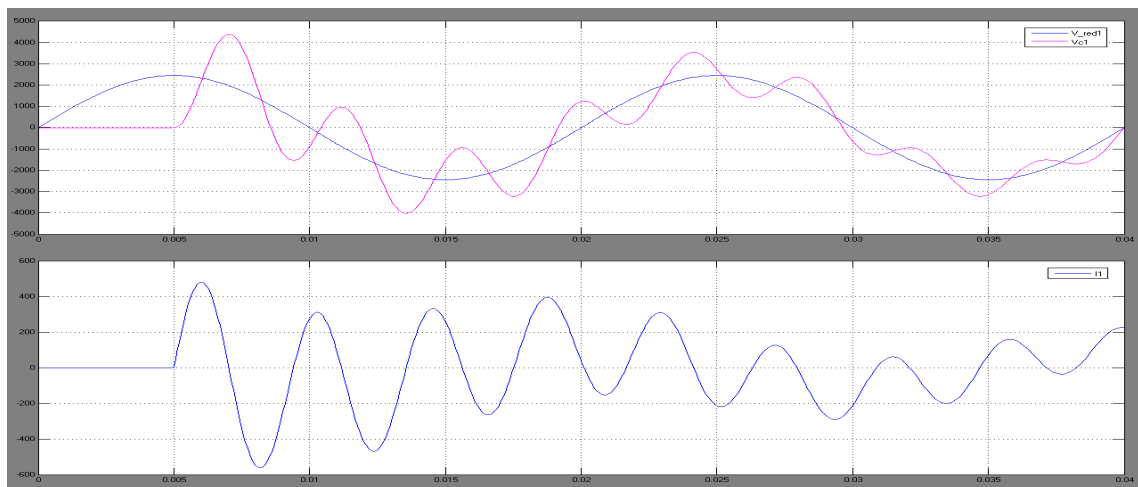


Figura 3.17 Tensión en bornas del condensador C_1 (rosa) en caso de conexión del primer escalón en $t=5$ ms, y corriente absorbida (azul) inferior

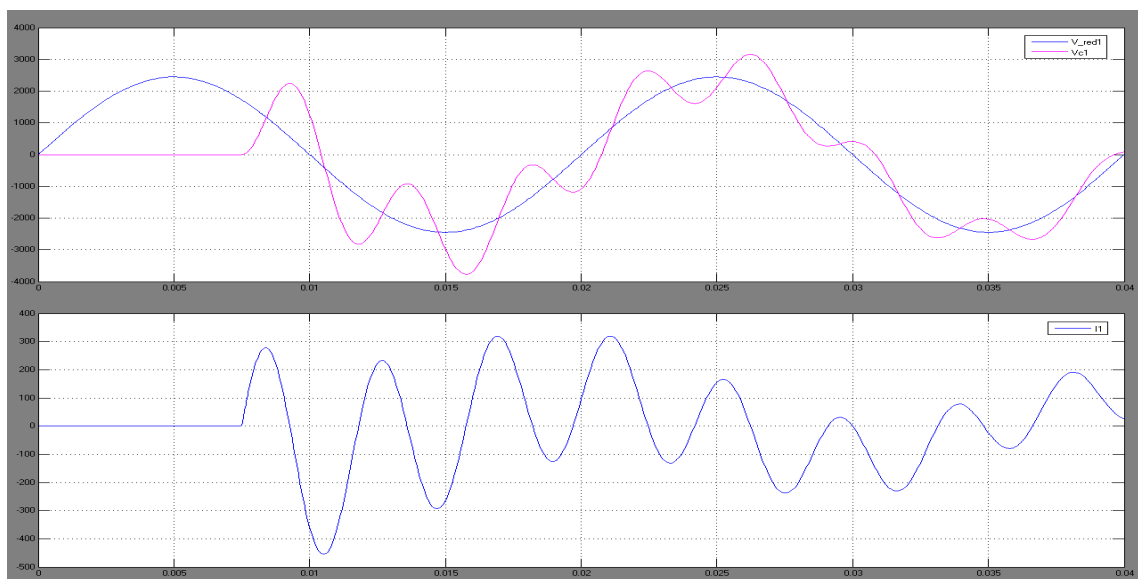


Figura 3.18 Tensión en bornas del condensador C_1 (rosa) en caso de conexión del primer escalón en $t=7.5$ ms, y corriente absorbida (azul) inferior

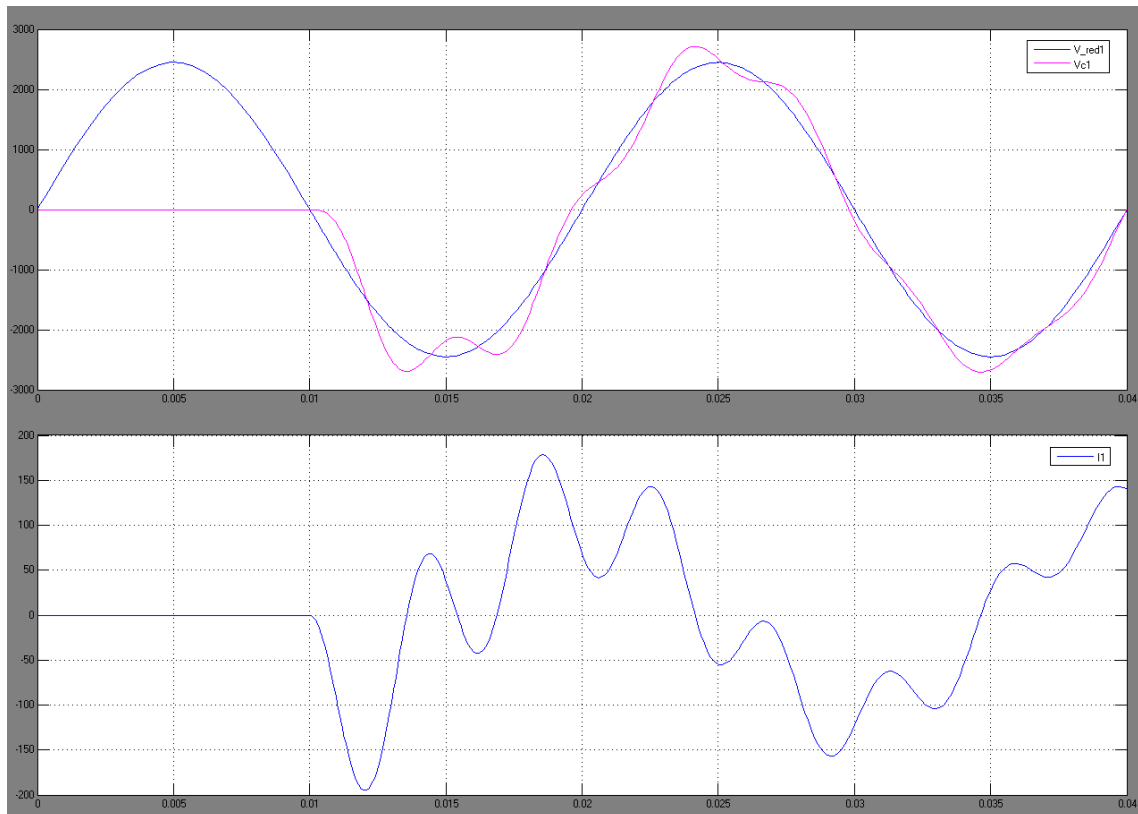


Figura 3.19 Tensión en bornas del condensador C_1 (rosa) en caso de conexión del primer escalón en $t=10$ ms, y corriente absorbida (azul) inferior

Como podemos apreciar en las figuras 3.18 y 3.19 las sobretensiones que resultan son menores y no alcanzan en ningún caso, a los alcanzados cuando la conexión del primer banco de condensadores se hace en un paso por un máximo de tensión que se simuló al principio de este apartado. Además se observa que el mejor de los casos para la conexión de la batería de condensadores es en $t=10$ ms, que coincide con el paso por cero de la tensión de red, en este instante se observa que el transitorio de tensión en la batería es mucho menor y la corriente que absorbe la batería de condensadores es de 178 Amperios.

En la figura 3.19 a, se puede observar el resultado de aumentar el valor de la inductancia $L1$ diez veces, a $200 \mu\text{H}$, podemos observar que el efecto resulta en una disminución sustancial de la corriente que circula por ambas capacidades ($C1$ y $C2$). Se obtiene un valor máximo de corriente de 800 A. Tal y como se estudió en la teoría del apartado 2.2 estas reactancias no tienen efecto en las tensiones.

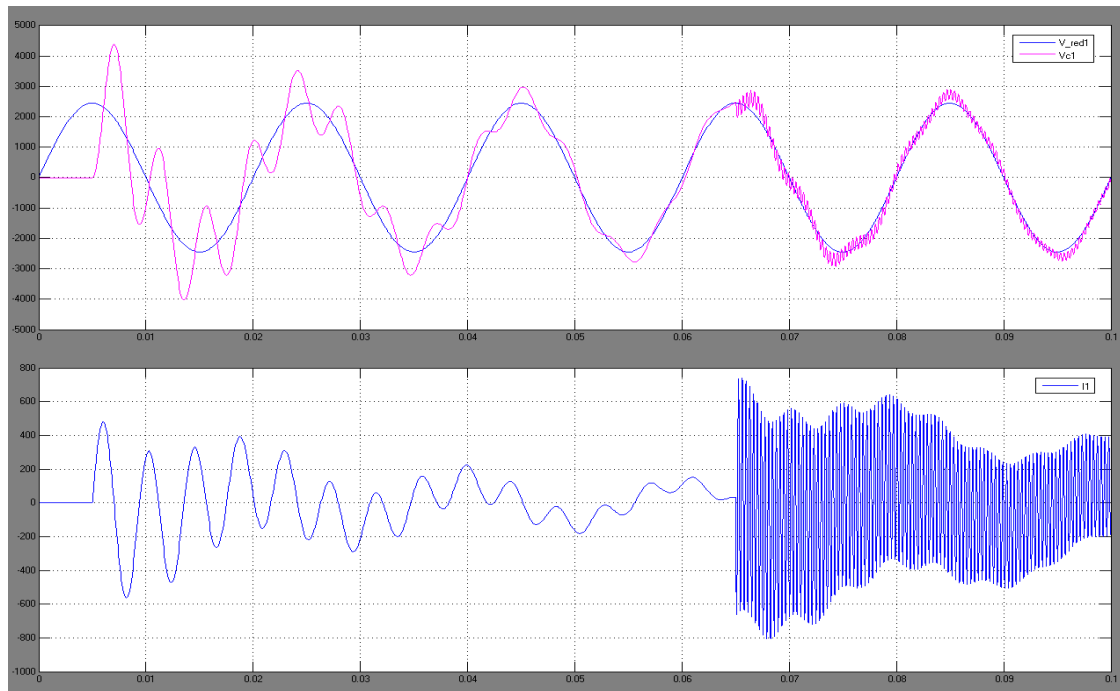


Figura 3.19 a. Tensión en C1 (rosa), tensión de red (azul superior) y corriente en C1 (azul inferior)

En la figura 3.19 b, al igual que en la figura 3.19 a se observa el efecto de aumentar la reactancia $L1$, en este caso la reducción de corriente es tan grande que la corriente en la conexión del segundo escalón es menor que la corriente en el primero. Esto significa que el introducir una reactancia tan elevada no es necesaria pues el objetivo de reducir las sobrecorrientes por debajo del valor del primer escalón no tiene sentido.

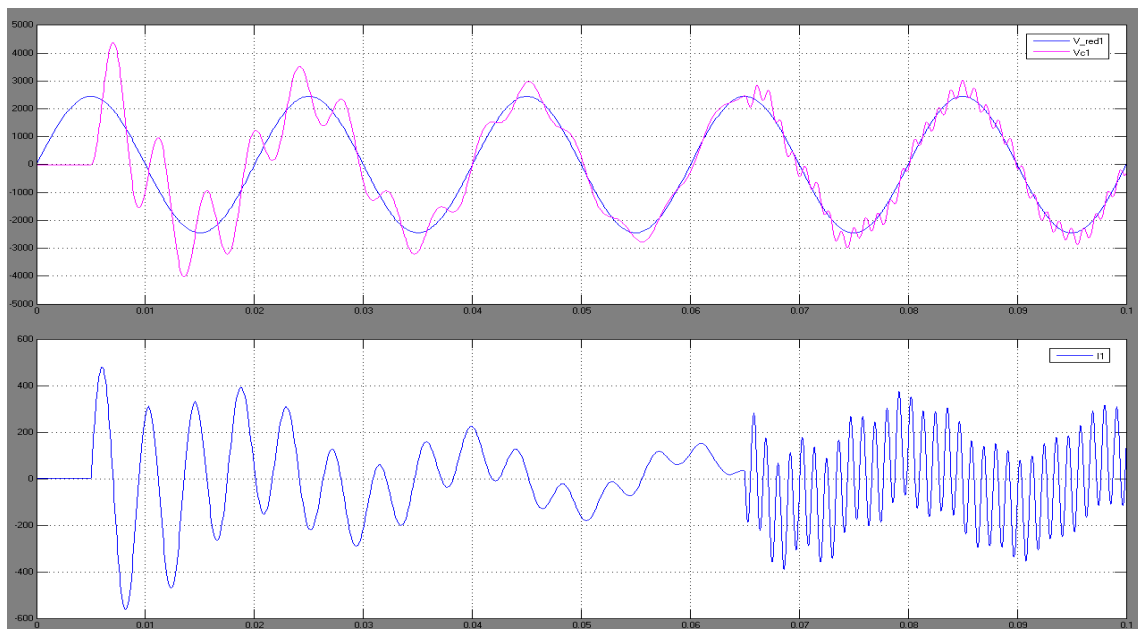


Figura 3.19 b. Tensión en C1 (rosa), tensión de red (azul superior) y corriente en C1 (azul inferior)

3.3.3 Transitorio de conexión de una batería de condensadores por escalones, sin reactancias limitadoras.

En el apartado anterior se ha considerado la existencia de una reactancia de $20\ \mu\text{H}$, en este apartado realizaremos la misma simulación que en el apartado 3.3.2 con la diferencia de que ahora utilizaremos una inductancia entre condensadores con un valor que sea diez veces menor al del apartado 3.3.2, para ilustrar de esta manera los efectos que produce el prescindir de las reactancias limitadoras entre escalones. La razón de no eliminarlas por completo del modelo es que en la realidad los conductores poseen un valor de inductancia muy pequeño y a la vez mejora la rapidez del simulador y los resultados obtenidos. (Si se ponen condensadores en paralelo sin una inductancia mutua el método de integración no converge).

En éste apartado vamos a modelar un circuito equivalente monofásico de una batería de condensadores conectada en estrella, frecuencia 50 Hz, cuyos datos de entrada serán:

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión de red de línea	U_r	3	kV
Potencia de cortocircuito de la red	S_{cc}	9	MVA
Potencia reactiva del condensador 1	Q_1	400	kVAr
Potencia reactiva del condensador 2	Q_2	50	kVAr
Inductancia entre condensadores	L_1	2	μH

Tabla 3.2: Valores de una red de potencia media

Los valores de los parámetros del circuito (capacidades, resistencias, reactancias) son los mismos que en el apartado 3.3.2, salvo por lo que se refiere a la reactancia L_1 .

El circuito a estudiar en este caso se muestra en la figura 3.20:

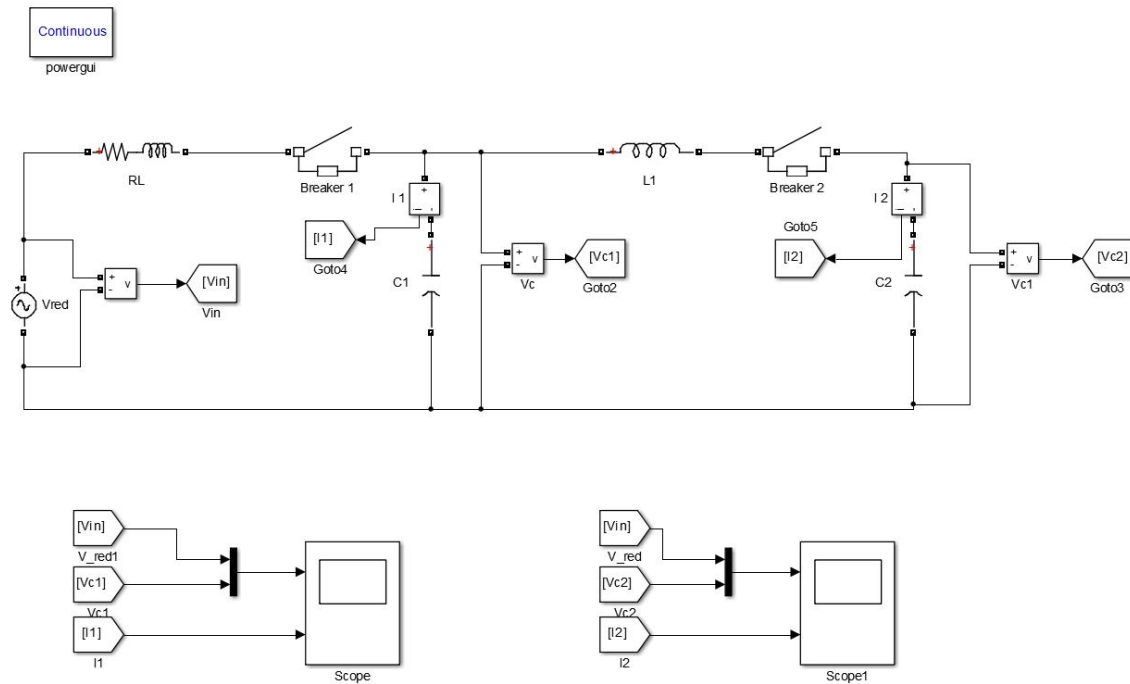


Figura 3.20 Banco de condensadores de dos escalones sin reactancia limitadora

Como podemos observar en la figura 3.20 representamos el equivalente Thèvenin del sistema eléctrico, modelado como una fuente de tensión alterna en serie con la impedancia RL . A continuación presentamos el interruptor (Breaker 1), el condensador C_1 , y en paralelo la inductancia L_1 , el interruptor 2 y el condensador C_2 .

Como hemos visto en el apartado 2.2 es necesario que la tensión en el condensador C_1 se establezca antes de conectar la segunda batería, de lo contrario la corriente absorbida por la segunda batería sería muy elevada, poniendo en peligro la instalación.

El tiempo total de simulación es de 100 ms, el interruptor 1 está configurado para que se cierre en $t=5$ ms, que coincide con un máximo en la onda de tensión de la red (el peor de los casos). Cuando la tensión en el condensador C_1 sea parecida a la de la red, se cierra el interruptor 2 en $t=65$ ms, al igual que el primer escalón en el primer máximo de tensión.

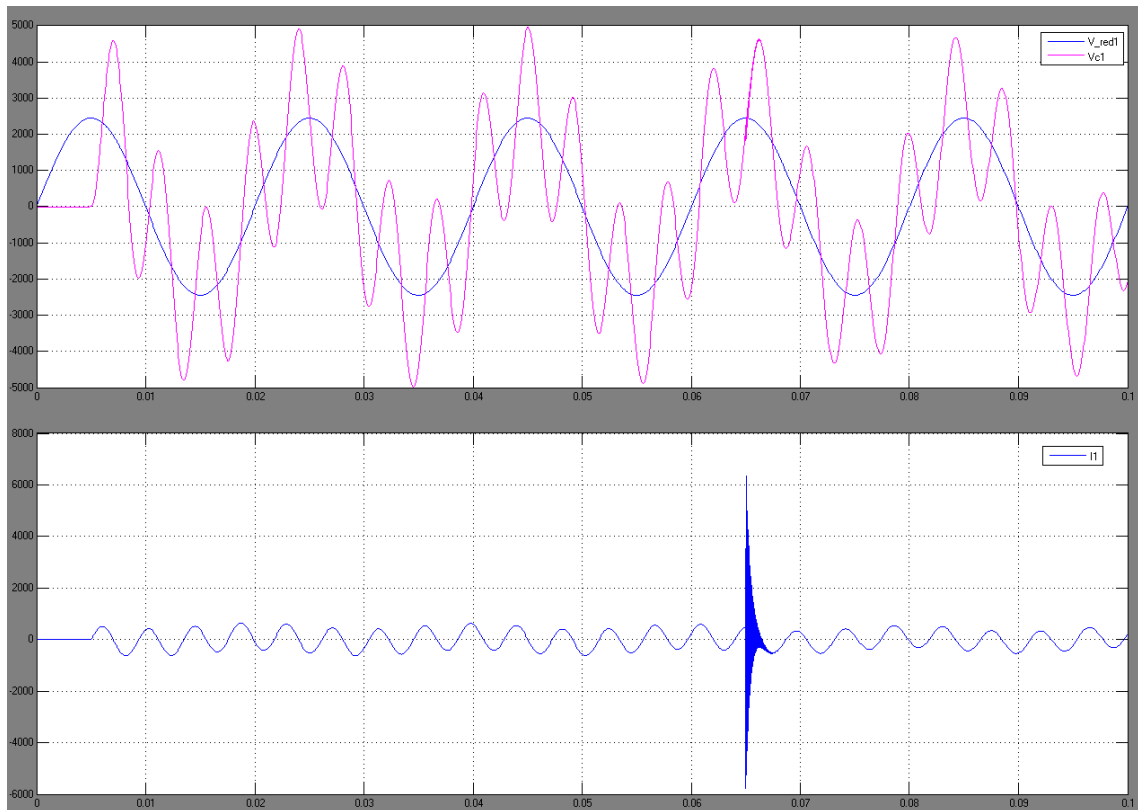


Figura 3.21 Tensión de red (azul) y tensión en C_1 (rosa) en la parte superior, Corriente en el condensador (azul) en la parte inferior.

Como podemos apreciar en la figura 3.21 el efecto de prescindir de la reactancia limitadora, produce que el amortiguamiento sea menor. El transitorio de tensión alcanza un valor pico de 5.000 voltios, que es más del doble de la tensión de red. Como era de esperar, los resultados obtenidos en este apartado van en concordancia con lo estudiado en el capítulo 2, apartado 2.2, en el que se ilustra el efecto de prescindir de la inductancia limitadora de corriente entre condensadores del banco de condensadores por escalones. El valor de la tensión calculada de forma analítica es de:

$$2 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * U = 2 * 3.000 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4.899 \text{ V}$$

Que es muy parecida al obtenido pues sólo se comete un error del 2%, si medimos la frecuencia obtenemos 238 Hz, que comparado con la frecuencia calculada según la ecuación (2.9 bis) es

$$f_0 = f \cdot \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot 10^6}{400 \cdot 10^3}} = 237 \text{ Hz}$$

Si observamos la figura 3.21 en $t=65$ ms, cuando se conecta la segunda batería de condensadores, se aprecia que el efecto sobre la tensión es similar al del primer escalón y no supone un riesgo para la instalación.

Sin embargo, y como se aprecia en la figura 3.21, el transitorio de corriente no se comporta de igual manera, ya que presenta una sobrecorriente que alcanza un valor de 6.400 Amperios y frecuencia 10.000 Hz, que supone un aumento de casi 3 veces el valor de corriente, comparado con el caso en que sí se incluye la reactancia limitadora, que debe de absorber la batería de condensadores en el instante de conexión.

En la figura 3.22 se observa la sobretensión en C_2 , como se aprecia la tensión no sufre grandes oscilaciones aunque sí es muy rápido pues oscila con una frecuencia de 10.000 Hz. En cuanto a la corriente vemos que efectivamente la corriente es la misma que absorbe el escalón C_1 , 6.400 amperios y 10.000 Hz, además el transitorio es muy largo pues después de dos ciclos el transitorio no se ha terminado.

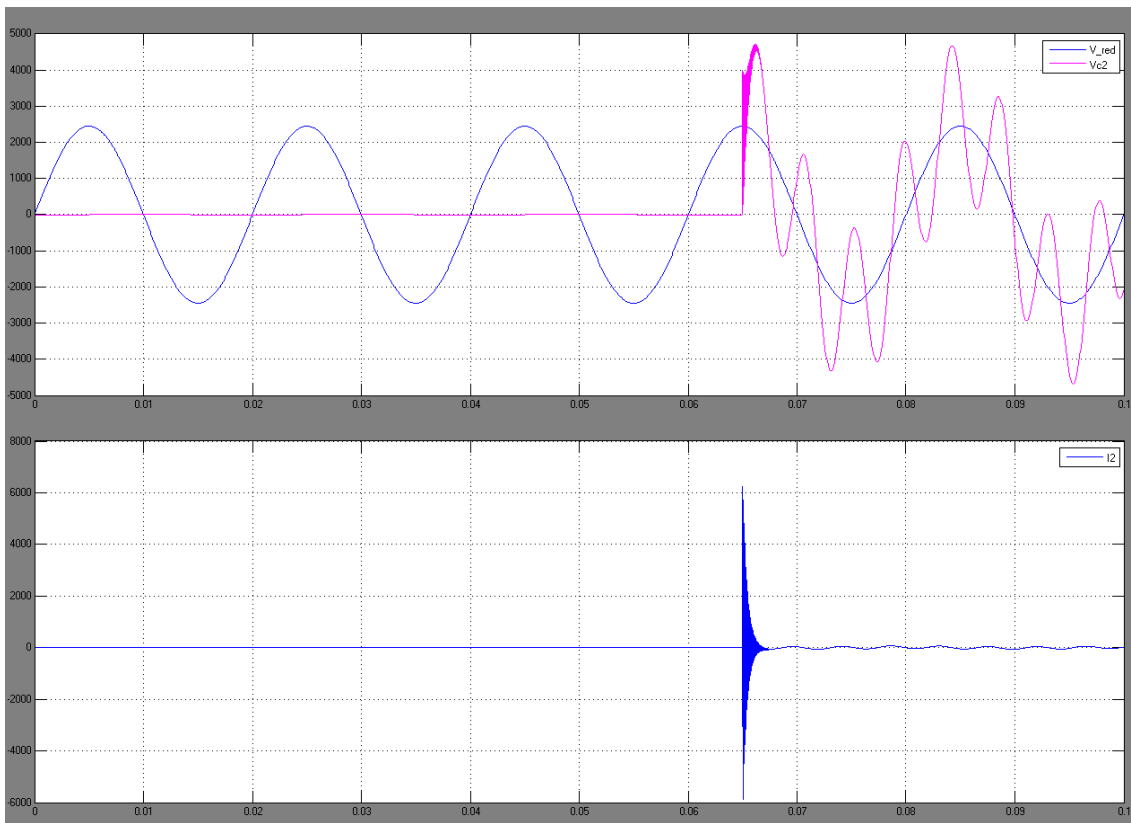


Figura 3.22 Tensión de red (azul) y tensión en C_2 (rosa) en la parte superior, y corriente en C_2 (azul) en la parte inferior.

Si utilizamos las relaciones que se estudiaron en el apartado 2.2, se obtienen los valores de corriente que deberían de resultar en las simulaciones:

$$i_2(t) = \frac{(u_1(0^+) - u_2(0^+))}{L_{eq}\omega_{01}} \text{sen}\omega_{01}t \quad (2.19)$$

Al sustituir nuestros datos en $i_2(t_1)$, obtenemos la amplitud del pico de corriente:

$$I_2 = \frac{\left(3.000\sqrt{\frac{2}{3}} - 0\right)}{2 \cdot 10^{-6} * \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 10^{-6} * 15,71 \cdot 10^{-6}}}} = 6.865 \text{ A}$$

Este valor es un 107 % mayor que el obtenido en la simulación, la explicación a este resultado es que en la ecuación (2.19) no se ha tenido en cuenta la resistencia de la red, ya que si se hubiera tenido en cuenta la corriente sería menor, pero dado que en este estudio mediante simulaciones se representa el sistema de una forma lo más aproximada posible, podemos suponer que resultado es válido, pues es un resultado razonable.

El estudio en el apartado 2.2, nos llevo a decir que el efecto de las reactancias limitadoras, en este caso modeladas como inductancias, tiene efectos positivos sobre la corriente que absorbe el banco de condensadores al reducir drásticamente la amplitud de la sobreintensidad en el periodo transitorio resultante de la maniobra de conexión. Además el efecto sobre la tensión en el condensador es tan pequeña que prácticamente se podría decir que no hay efecto, salvo en el caso de la frecuencia pues pasa de un valor de 238 Hz a 10.000 Hz, tal y como se ve en la figura 3.21 en el instante t=65 ms.

Caso de batería C₂ inicialmente cargada

En el apartado 3.3.1 se dijo que el peor de los casos se da cuando la batería de condensadores está inicialmente cargada, en este caso uniremos dos factores que se sabe que contribuyen positivamente al aumento de las sobretensiones por un lado y las sobrecorrientes por otro. Un factor es el tener la batería C2 inicialmente cargada y el otro el prescindir de la reactancia limitadora.

En la figura 3.22 a y 3.22 b se pueden ver los efectos que tienen en los transitorios de tensión y corriente, se puede comprobar que el valor de la sobretensión es de 5.000 V, el mismo valor obtenido con la capacidad C₂ inicialmente descargada. Sin embargo la corriente no sigue el mismo comportamiento pues alcanza un valor pico de 13.000 A y una frecuencia 30.000 Hz, en el apartado anterior se obtuvo un valor de 6.400 A, por tanto se comprueba que el valor de la sobrecorriente se ha duplicado.

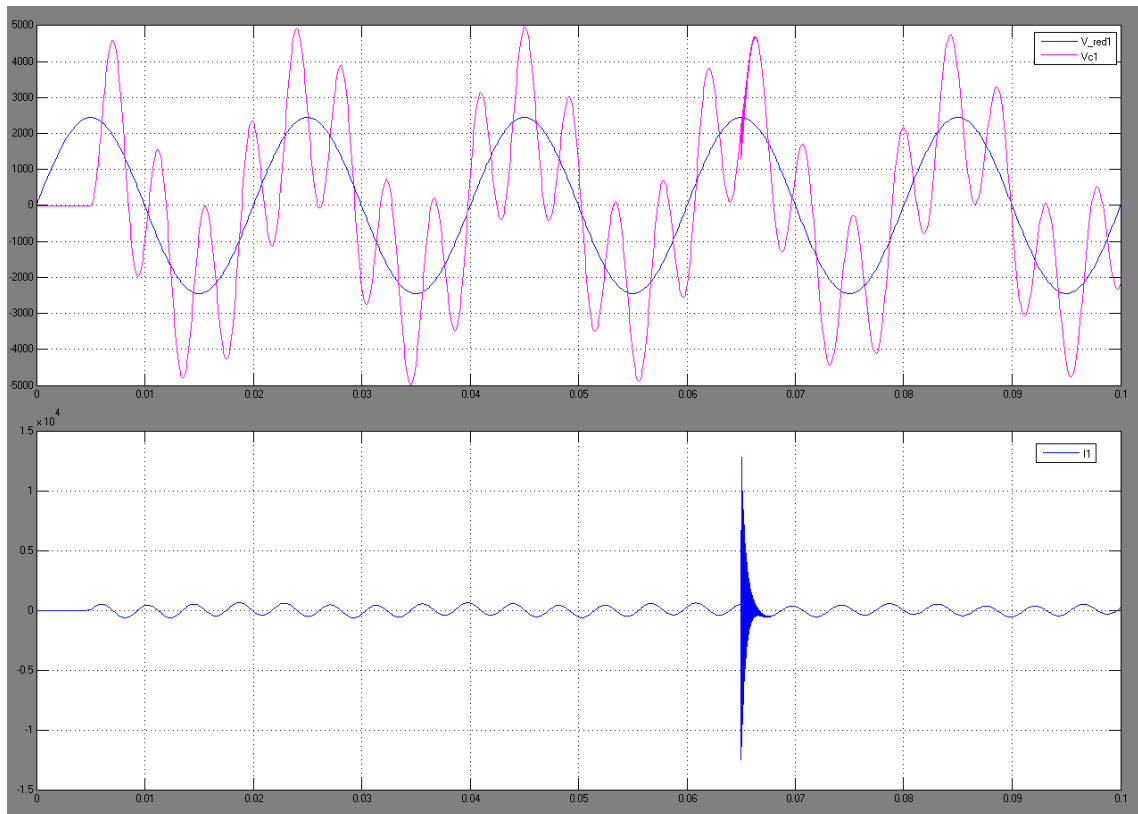


Figura 3.22 a Tensión de red (azul) y tensión en C_1 en la parte superior. Y corriente en C_1 (azul) inferior.

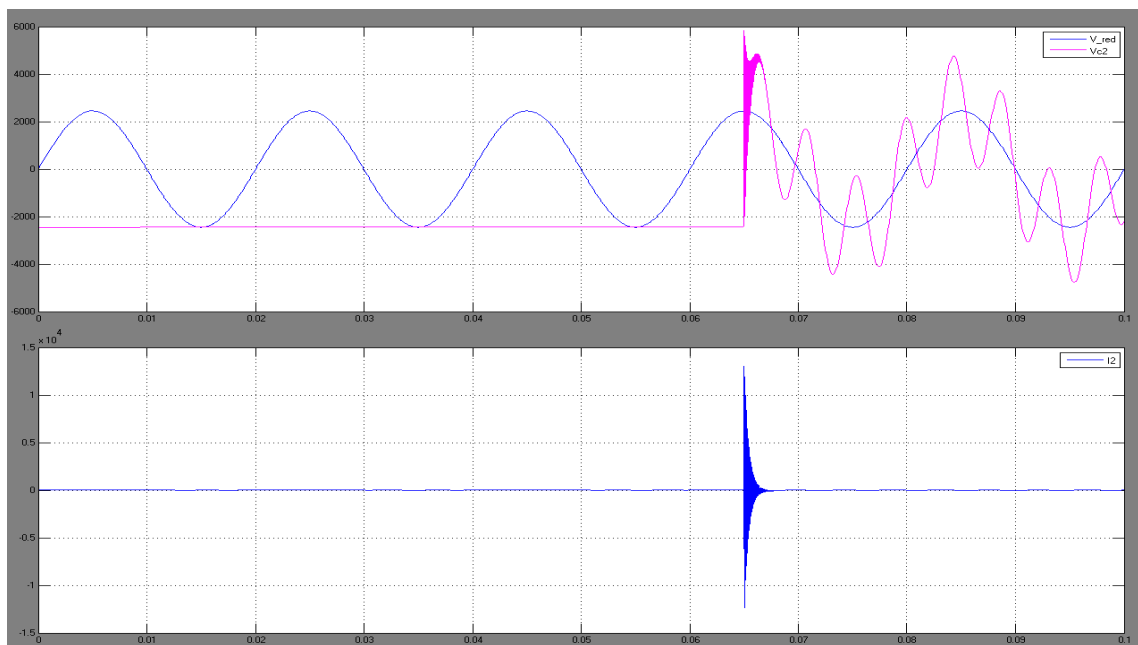


Figura 3.22 b Tensión de red (azul) y tensión en C_2 en la parte superior. Y corriente en C_2 (azul) inferior.

3.3.4 Transitorio de desconexión de una batería de condensadores a la red.

Para simular el transitorio de desconexión de una batería de condensadores de la red utilizaremos el modelo de la simulación del apartado 3.3.1. Se trata de un circuito RLC mostrado en la figura 3.23. La tensión de la red trifásica es 45 kV de tensión de línea con neutro puesto a tierra, la potencia de cortocircuito de la red es de 2.500 MVA, por lo que se refiere a la resistencia de la red consideraremos que $X/R=14$. La potencia de la batería de condensadores se tomará 5 MVar y está conectada en estrella con el neutro puesto a tierra.

Dado que la red es una red trifásica con el neutro puesto a tierra, los transitorios de cada una de las fases son independientes y por tanto sólo estudiaremos una de las fases.

Los parámetros del modelo fueron obtenidos en el apartado 3.3.1.

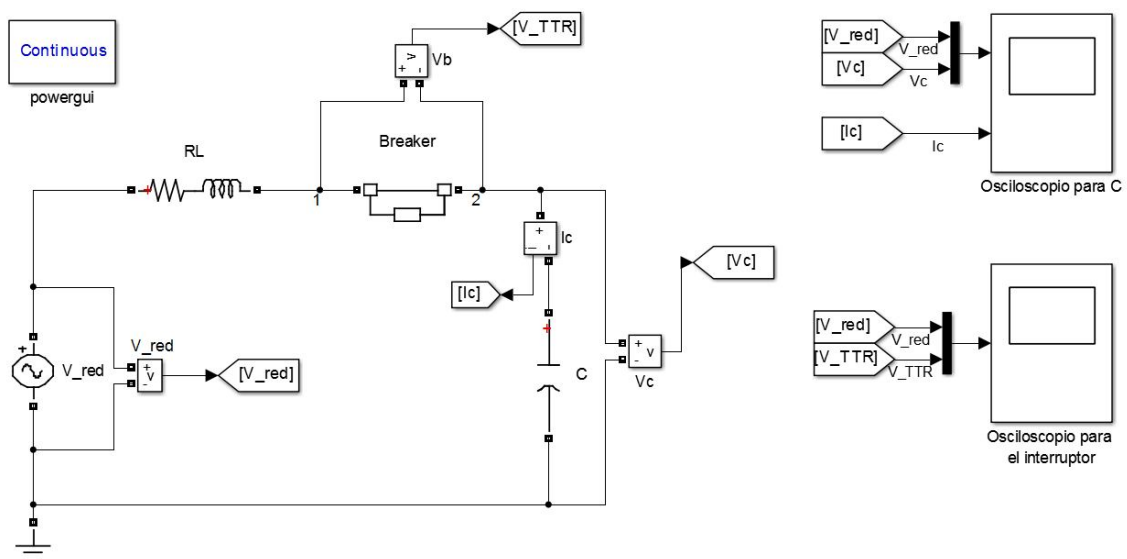


Figura 3.23 Modelo del circuito

En la figura 3.23 presentamos el modelo del circuito que se utilizará para el estudio del caso. La red está representada mediante su equivalente Thèvenin modelada por una fuente de tensión alterna, en serie con la línea modelada como una impedancia RL (de parámetros concentrados) y el interruptor, en paralelo se encuentra el condensador objeto de estudio.

En el circuito de la figura 3.23 hemos introducido los dispositivos de medida de magnitudes. En el primer osciloscopio podemos observar que V_red mide la tensión de la red, V_c e I_c la tensión y la corriente en el condensador respectivamente; en el segundo osciloscopio V_TTR mide la tensión transitoria de restablecimiento en bornas del interruptor durante la maniobra de apertura.

El tiempo total de simulación es de 60 ms, el interruptor está inicialmente cerrado y el condensador ha alcanzado el régimen permanente de tensiones e intensidades. La orden de apertura del interruptor se da en cualquier instante de tiempo posterior a $t=5$ ms. Sin embargo, el arco se extingue de forma efectiva en el primer paso por cero de la corriente, como se estudio en el apartado 2.3 un paso por cero de la corriente coincide con un máximo ó mínimo de tensión al estar desfasadas 90° . Como el interruptor de la simulación es un interruptor ideal, no se producen los cebados de arco que ocurren en la maniobra de desconexión de los interruptores reales, por ello se ha configurado el interruptor para que se abra y cierre según los siguientes criterios:

- La orden de apertura se ha dado en el instante $t=10$ ms.
- No se modela el comportamiento del dieléctrico, sólo se supone que la rigidez del dieléctrico no soporta la tensión entre contactos del interruptor cuando la tensión de red pasa por su máximo.
- Para simular el cebado del arco por causa de una baja rigidez dieléctrica en bornas del interruptor, se ha dado la orden de cerrar el interruptor en $t=25$ ms (se eligió este tiempo para simular el caso de que la rigidez dieléctrica del interruptor se supera precisamente en el caso más desfavorable, esto es, cuando la TTR es la máxima posible).
- Para simular la extinción del segundo arco que se forma al cebarse el interruptor se da la orden de apertura en un tiempo muy próximo al anterior: en el caso de la simulación 25,9 ms. De esta forma el segundo arco eléctrico tiene tres semiciclos de corriente. En realidad hubiera dado lo mismo dar la orden de apertura en cualquier otro momento en el que la corriente tenga un número de semiciclos impar (por ejemplo 25,09) pues al tener un número impar de semiciclos de corriente el condensador puede cargarse desde una tensión próxima a la de red hasta una tensión próxima al doble de la de red. Sin embargo, si se hubiera dado la orden de apertura en un instante tal como 25,5 ms la onda de corriente tendría dos semiciclos, con lo cual la carga neta que llega al condensador (integral de la corriente) es nula y el condensador al cabo de dos semiciclos de corriente queda cargado a una tensión prácticamente idéntica a la que había antes del recebado del arco.
- Los tiempos de cierre se han elegido en función de la rapidez de los transitorios que suceden después de la maniobra de apertura.

En la figura 3.24 se puede observar los transitorios de tensión que se dan en la batería de condensadores C. En $t=15$ ms la batería queda cargada al valor de la tensión de red $V_c = 36.742 V$ en el instante de apertura, en $t=25$ ms la tensión transitoria de restablecimiento supera la rigidez dieléctrica del interruptor, cerrando el circuito nuevamente y produciéndose el cebado de arco, en $t=25.9$ ms se abre nuevamente el interruptor simulando la extinción del arco y dejando la batería C cargada a un valor de tensión superior $V_c = 106.000 V$, en $t=35$ ms la tensión transitoria de restablecimiento vuelve a superar la rigidez del dieléctrico (se cierra el interruptor) produciéndose un recebado de arco nuevo, esta vez con una tensión inicial mayor, en $t=35.9$ ms se vuelve a abrir el interruptor al segundo paso por cero de la corriente, simulando de esta manera la extinción del arco y dejando nuevamente cargado el condensador C con un

valor de 170.000 V , un valor 4.6 veces la tensión de la red, esto supone un peligro real para la instalación y su correcto funcionamiento.

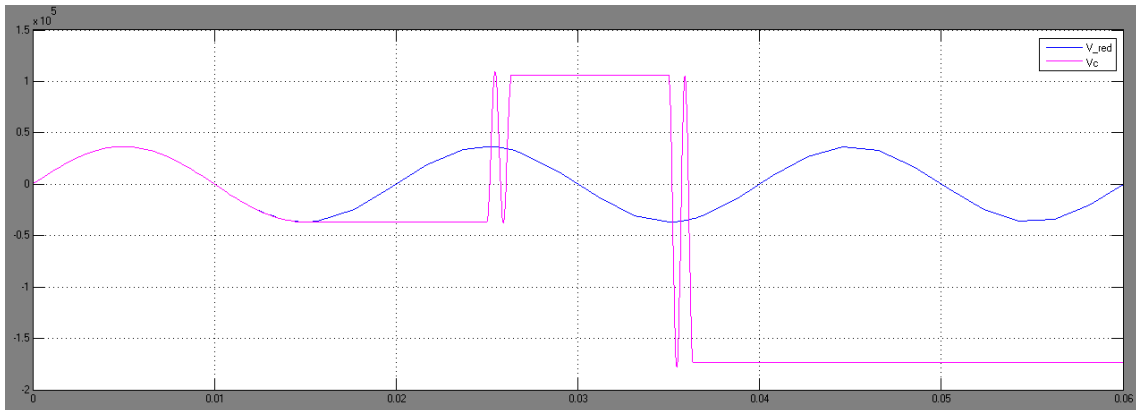


Figura 3.24 Tensión de red (onda azul) y tensión en el condensador (rosa)

Para comprobar si efectivamente la simulación se aproxima a los valores analíticos estudiados en el apartado 2.3 del anterior capítulo, se utilizarán las ecuaciones:

$$u(t) = \sqrt{2}U(2\cos \omega t - 1) \quad (2.28)$$

$$i(t) = 2\sqrt{2}U \sqrt{\frac{C}{L_r}} \operatorname{sen} \omega t \quad (2.29)$$

Siendo

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C}} \quad (2.30)$$

La pulsación propia del circuito, y U la tensión eficaz simple.

Sustituyendo en las ecuaciones los valores del modelo simulado, obtenemos la frecuencia de las oscilaciones y la amplitud de la tensión después del primer reencendido:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2,58 \cdot 10^{-3} * 7,86 \cdot 10^{-6}}} = 7.022 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{7.022}{2\pi} = 1.118 \text{ Hz}$$

$$u(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 45 \cdot 10^3 (2 * \cos 7.022 * t - 1) \quad (2.28 \text{ bis})$$

El valor máximo de la tensión en el condensador en el primer reencendido se obtiene de la ecuación (2.28 bis) haciendo el valor del coseno igual a -1. De esta forma el valor máximo de la tensión en el primer reencendido es:

$$U_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 45 \cdot 10^3 \cdot 3 = 110.000 \text{ V} \quad (2.28 \text{ bis})$$

Próximo al valor 106 kV obtenido por simulación y con un error del 3,6%.

En la figura 3.25 se presenta el resultado de la simulación en cuanto a las sobrecorrientes que circulan en la batería de condensadores C. En la parte izquierda de la figura se observa la corriente de régimen permanente del condensador, cuyo valor es muy pequeño en relación a la escala de la figura y pasa casi desapercibido. Se observa que el valor en magnitud de las corrientes en el primer cebado alcanza un valor pico de 4.000 A y 1.111 Hz, en el segundo recabado alcanza un valor pico de 8.000 A y 1.111 Hz. Esta es la corriente que circula cuando se produce un recabado del arco, y supone un aumento de entre 60 y 120 veces la corriente nominal de 64 A eficaces.

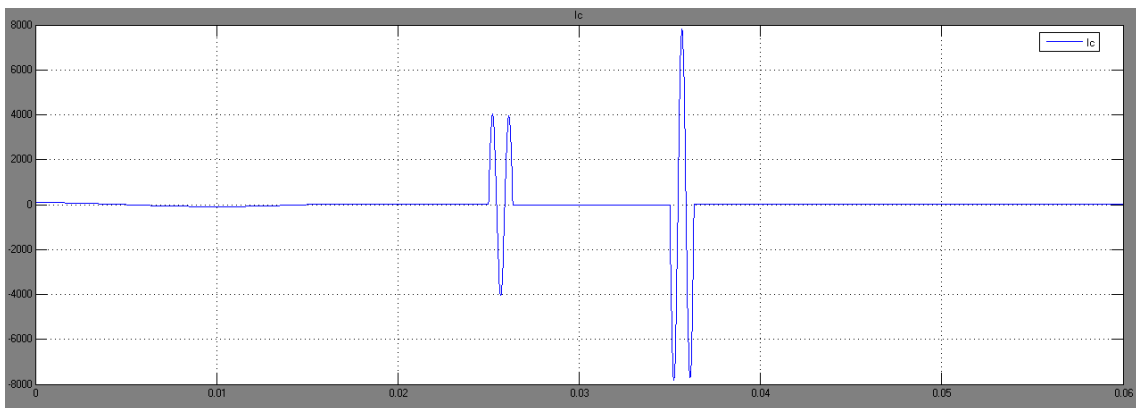


Figura 3.25 Corriente en el condensador.

En la figura 3.26 se presenta un zoom de la figura 3.25, en la que se aprecia de forma más clara la corriente de régimen permanente del condensador y el momento de apertura del interruptor, que coincide con un paso por cero de la corriente ($t=15$ ms) aunque la orden de apertura se dio mucho antes ($t=10$ ms). A partir de $t=15$ ms el valor de la corriente queda igual a cero hasta el primer recabado que tiene lugar en $t=25$ ms.

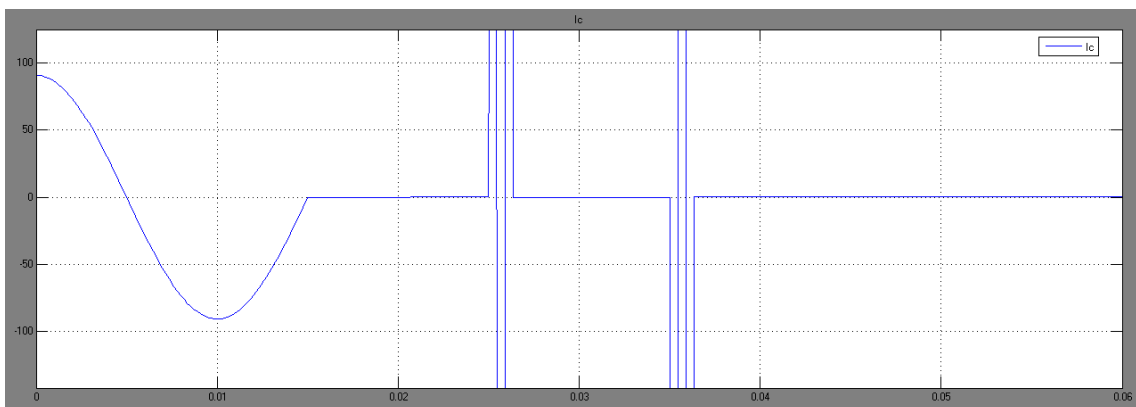


Figura 3.26 Ampliación de la figura 3.25. Corriente en el condensador

En la figura 3.26 se puede ver que la corriente antes de $t=15$ ms, pasa por cero en $t=5$ ms. La razón de que la corriente no se extinga al primer paso por cero es debido que en esta simulación se decidió dar la orden de apertura del interruptor en $t=10$ ms con objeto de mostrar la primera onda de corriente al completo para tener una mejor

comprensión del caso. Sin embargo bastaría con configurar el interruptor para que se abra en $t=5$ ms y obtendríamos los mismos resultados, eso sí, desplazados en el tiempo.

En la figura 3.27 se presenta la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) en bornas del interruptor. Como puede apreciarse la tensión entre bornas del interruptor crece a partir de $t=15$ ms, que es el momento de desconexión, desde cero hasta un valor máximo de 73.500 V que coincide al valor de 2 veces la tensión máxima fase-neutro de red. Cuando el cebado del arco se produce la tensión transitoria de restablecimiento cae a cero tal y como se aprecia en los instantes que van de $t=[25; 25,9]$ ms y de $t=[35; 35,9]$ ms, ya que al establecerse el arco la diferencia de tensión entre contactos es muy reducida. Además en la figura 3.27 se aprecia cómo en los sucesivos recibidos la tensión transitoria va aumentando su valor a medida que se producen los sucesivos arcos, dejando en la batería de condensadores una carga mayor y, si no se controla, reduciendo la seguridad y buen funcionamiento de las instalaciones.

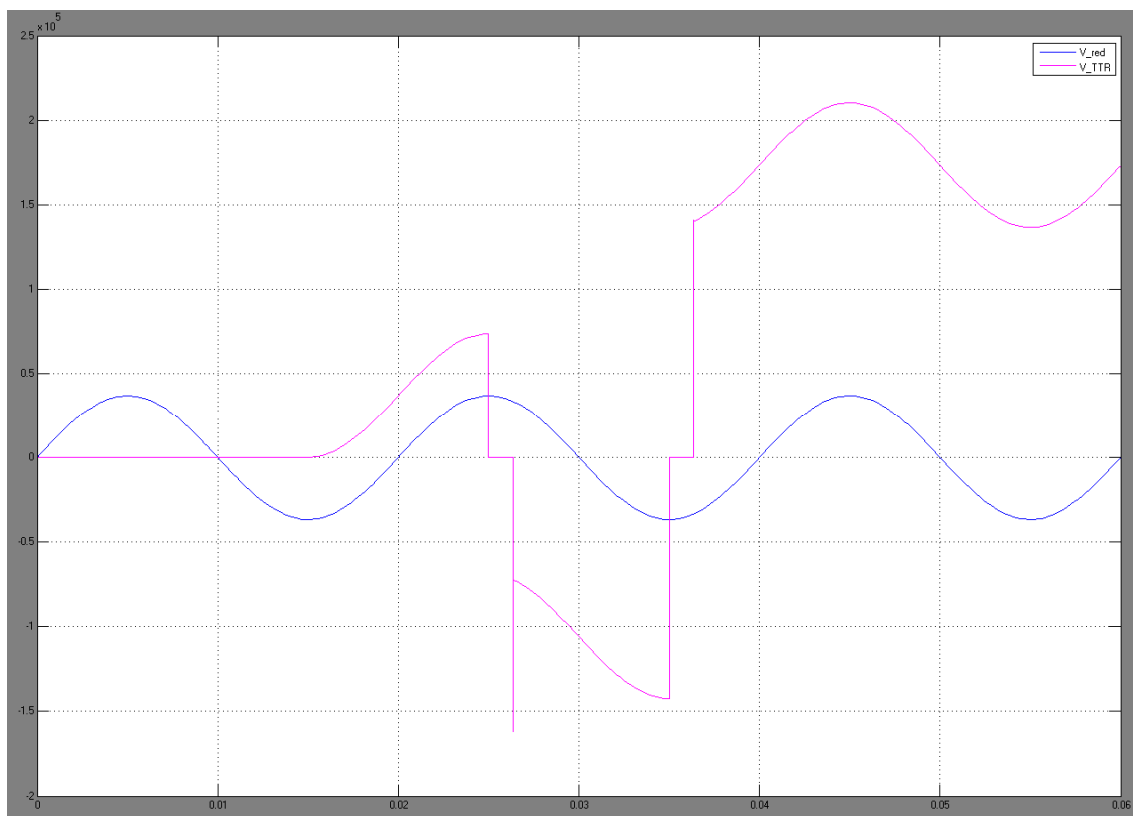


Figura 3.27 Tensión de red (azul) y tensión transitoria de restablecimiento (TTR en rosa)

Como se puede apreciar en la figura 3.27 la TTR sigue creciendo.

Después del primer cebado del arco: En $t=25.9$ ms la TTR comienza con un valor de -70.000 V y pasa a -142.400 V en $t=35$ ms.

Después del segundo cebado del arco: En $t=35.9$ ms comienza con un valor de 140.200 V y pasa a 210.000 V en $t=45$ ms.

Si los sucesivos cebados se producen de forma continua la tensión transitoria de restablecimiento seguiría creciendo si no se evacua de forma adecuada toda la energía almacenada.

La desconexión de baterías de condensadores es una operación de maniobra del sistema eléctrico y debe ser estudiada por las enormes cantidades de energía que quedan atrapadas en las baterías de condensadores, ya que la carga que se almacena puede suponer un aumento de la tensión en el punto de conexión, reduciendo de esta manera la calidad de la energía y la seguridad del sistema eléctrico.

CASO DE CONSIDERAR UNA RESISTENCIA DE DESCARGA

En el caso de considerar una resistencia de descarga el modelo a estudiar es el mismo que en el apartado anterior salvo que en este caso añadiremos una resistencia de descarga R' en paralelo al condensador C con el objetivo de evacuar la energía almacenada en ésta.

En la figura 3.28 se observa que el modelo a estudiar tiene la misma configuración que en el apartado anterior, al igual que los parámetros y los dispositivos de medida.

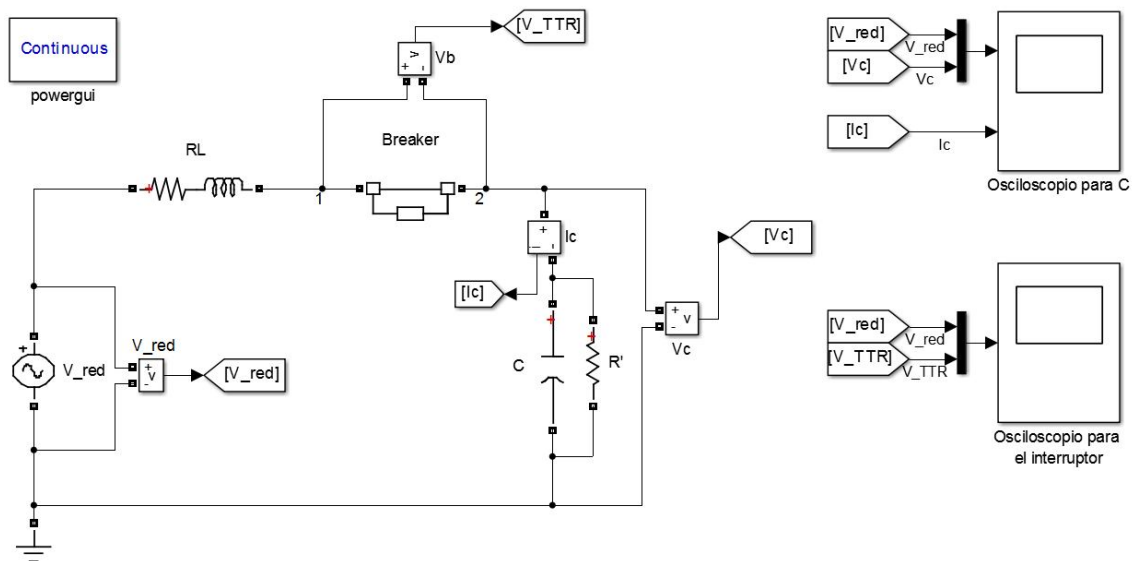


Figura 3.28 Modelo del circuito a simular. Banco de condensadores con resistencia de descarga

El valor de la resistencia de descarga será tal que la tensión en el condensador C se reduzca a la mitad en 10 ms. Para ello calcularemos el valor de la resistencia que sería necesaria para tal fin:

Primero sabemos que al desconectar la batería de condensadores C queda cargada al valor de tensión que en ese instante se produce en el transitorio, tal y como se observa en la figura 3.29.

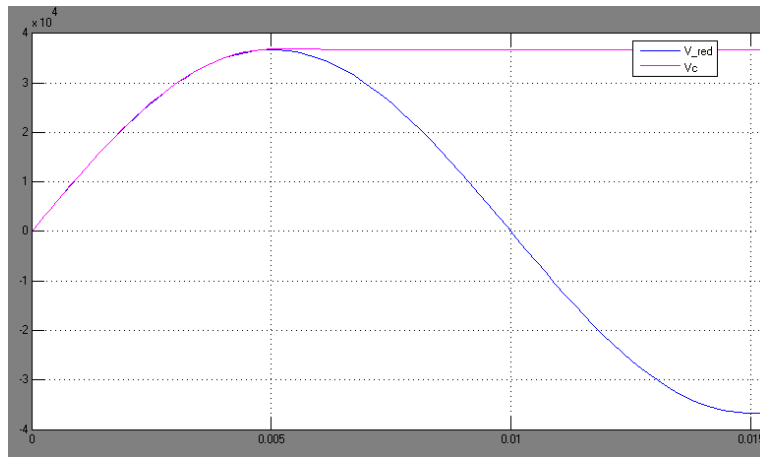


Figura 3.29 Carga de la batería de condensadores C

El valor de tensión con que queda cargada la batería es de 36.742 V, por tanto sabemos que:

$$u_c(0) = 36.742 \text{ V}$$

El circuito de descarga es el de la figura 3.30, donde R es la resistencia que evacuará la energía almacenada por el condensador al exterior en forma de calor por efecto Joule.

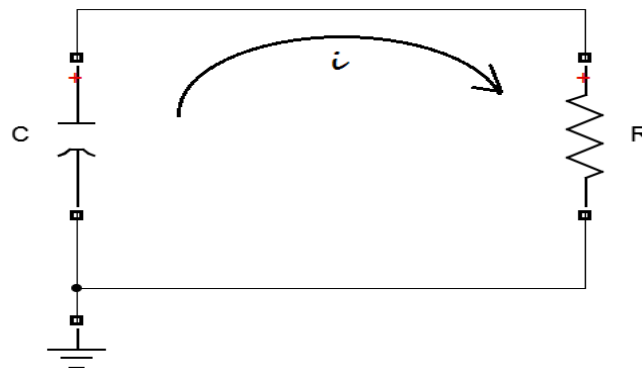


Figura 3.30 Circuito de descarga

Las ecuaciones del circuito de descarga son:

$$u_c = R \cdot i \quad (3.1)$$

$$i = -C \frac{du_c}{dt} \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación 3.2 en 3.1 obtenemos la E.D.O de primer orden:

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{RC} = 0 \quad (3.3)$$

Reordenando la ecuación queda

$$\frac{du_c}{u_c} = -\frac{dt}{RC} \quad (3.3 \text{ bis})$$

Integrando

$$\ln(u_c) = -\frac{t}{\tau} + k$$

Donde $\tau=RC$ es la constante de tiempo del circuito.

Usando las condiciones de contorno del condensador (la tensión aplicada no puede variar de forma discontinua) se llega a:

$$u_c(t) = u_c(0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.4)$$

En esta simulación se pretende disminuir el valor de la tensión que queda atrapada en la batería de condensadores a un valor que sea la mitad de la tensión inicial al cabo de 10 ms.

Sustituyendo el valor de la ecuación 3.1 en la ecuación 3.4, y que:

$$u_c(t = 10 \text{ ms}) = \frac{u_c(t = 0)}{2}$$

Despejamos y calculamos el valor de R:

$$R = \frac{t}{C \cdot \ln(2)} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{7,86 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(2)} = 1.835 \, \Omega$$

Por tanto éste es el valor de la resistencia de descarga que debe usarse para evacuar la energía almacenada en el condensador.

En la figura 3.31 se muestra el efecto de introducir la resistencia de descarga en paralelo a la batería de condensadores C. En $t=15$ ms se extingue el arco eléctrico y el condensador queda cargado a 36.742 V, a partir de ese momento el condensador se va descargando gracias a las resistencias en paralelo, y en $t=25$ ms la tensión en el condensador es de 18.371 V. En la simulación se admite que en ese instante de tiempo el medio entre contactos del interruptor no tiene rigidez dieléctrica suficiente como para soportar esa tensión y se ceba el arco de nuevo.

Se observa como el circuito de descarga reduce el valor de las tensiones, pues ahora se reducen las sobretensiones que la batería de condensadores debe de soportar. Ahora la sobretensión que se produce en el cebado del arco es menor, antes se alcanzaban los 106.000 V y ahora solo 91.000 V, esto supone una reducción de 15.000 V, es decir, un 16%.

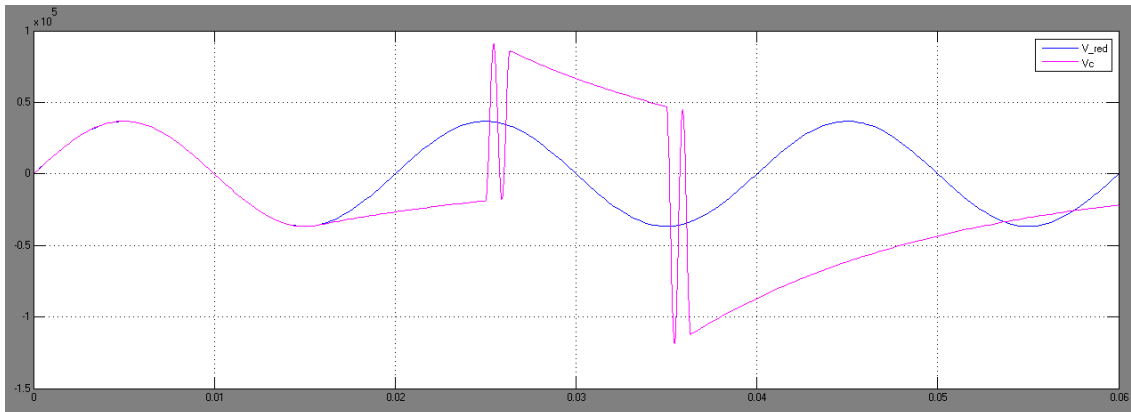


Figura 3.31 Tensión en la batería de condensadores C (rosa) y tensión de la red (azul)

También es digno de mencionar que el efecto de los posteriores cebados siguen aumentando la carga de la batería, tal y como se aprecia en el segundo cebado al alcanzar un valor pico de -93.800 V.

Los efectos sobre las corrientes en el condensador C en el transitorio se muestran en la figura 3.32 en la que se puede comprobar que el valor de la corriente es mucho menor, por tanto, la batería de condensadores se ve menos solicitada mejorando su funcionamiento y seguridad.

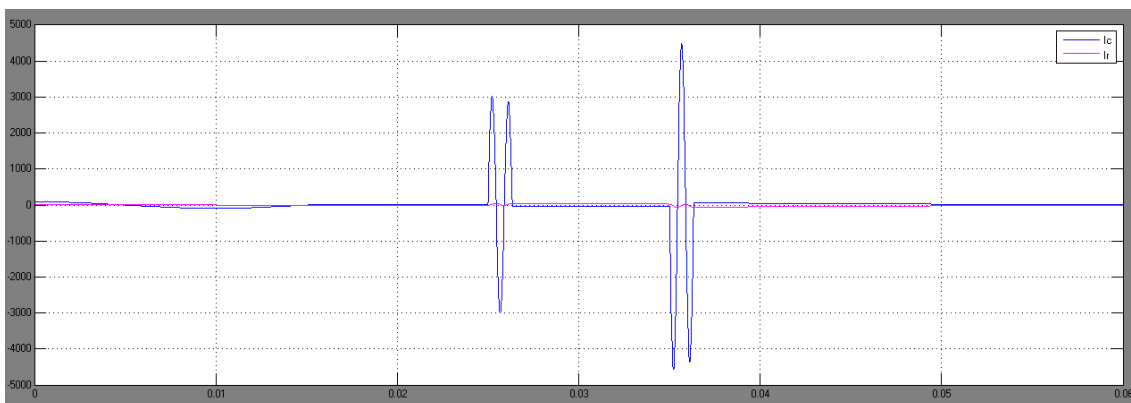


Figura 3.32 Corriente en el condensador C (azul) y corriente en la resistencia (rosa)

Se puede comprobar que el valor en amplitud de la sobrecorriente disminuye, pues antes alcanzaba un valor pico de 4.000 A, mientras que ahora solo alcanza los 3.000 A en el primer cebado. En el segundo cebado si no existe resistencia de descarga se alcanzaba un valor pico de 8.000 A, pasando ahora a 4.500 A. Esta reducción de los valores pico alcanzados por los transitorios nos indica que el sistema está mejor amortiguado y cumple con las especificaciones de diseño anteriormente mencionadas.

Como era de esperar la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) también ha disminuido, en la figura 3.33 se puede observar que la TTR máxima disminuye sustancialmente, en comparación con la figura 3.27 en la cual el circuito no incorpora la resistencia de descarga.

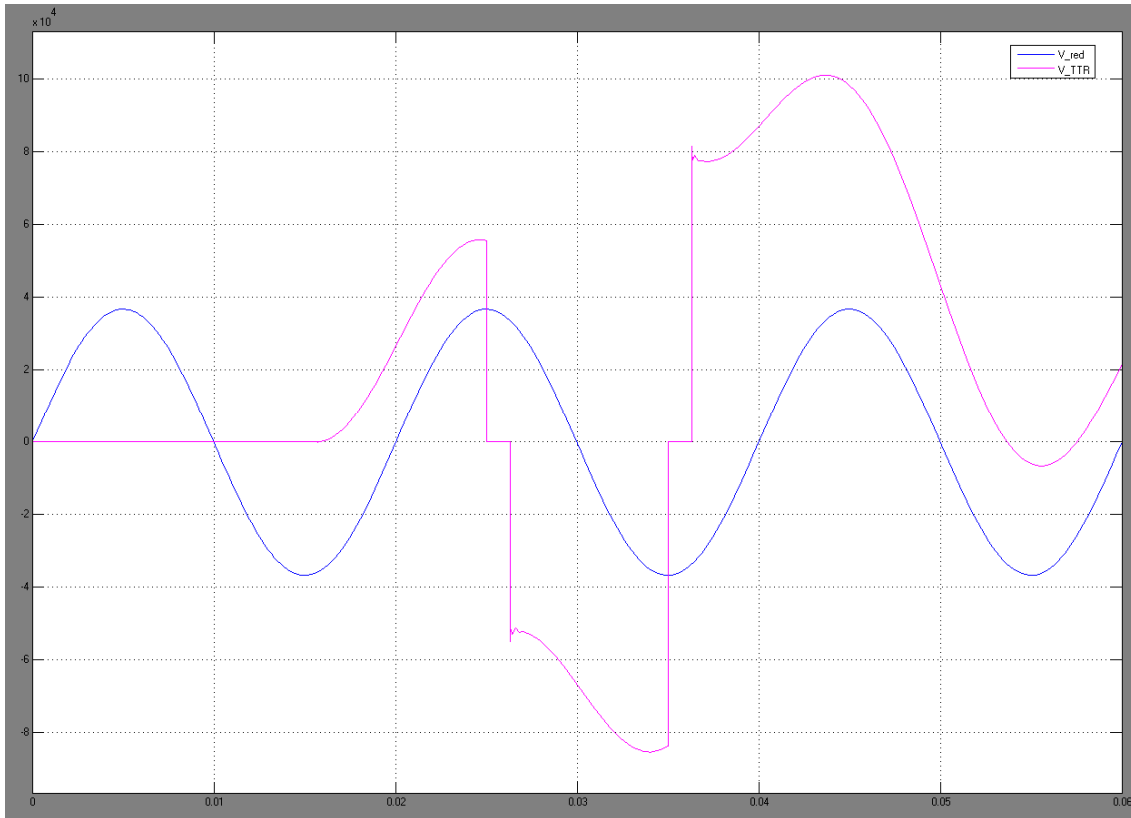


Figura 3.33 Tensión transitoria de restablecimiento TTR (rosa), y tensión de la red (azul)

Se puede comprobar cómo los valores máximos de la TTR se reducen, pues en el primer cebado pasa de un valor de 73.500 V a un valor de 55.500 V y supone una reducción de un 25% en la sollicitación del interruptor. Y en el segundo cebado de arco pasa de -142.000 V a un valor cercano a -84.000 V que supone una reducción de casi el 50% en la TTR que debe de soportar el interruptor.

En las simulaciones que se realizaron sin resistencia de descarga se admitió que el interruptor puede soportar una TTR de a lo sumo 73.500 V sin que se cebé el arco, y el arco se cebaba en $t=25$ ms cuando la TTR superaba este valor. Al añadir una resistencia de descarga estamos viendo que la TTR baja a los 55.500 V con lo cual es incluso posible que en el caso de que se disponga de resistencias de descarga no se produzca un recebado del arco.

La resistencia de descarga utilizada en las simulaciones anteriores, conectada a la red de 45 kV consume en régimen permanente una corriente de 14,16 A, y dado que la corriente capacitiva consumida por el condensador en régimen permanente es de 64,15 A, la corriente consumida por el conjunto condensador-resistencia de descarga sería de 65,70 A con un factor de potencia de 0,216 y un potencia activa consumida de 1,1 MW.

El elevado factor de potencia y la elevada potencia activa consumida por el conjunto resistencia-batería de condensadores es a menudo inadmisibles para una instalación real, debido a ello volveremos a realizar las simulaciones pero con una resistencia tal que el factor de potencia de la instalación no supere 0,05.

En estas circunstancias

$$P = \frac{Q}{\text{tg}\varphi} = \frac{5.000}{20} = 250 \text{ kW}$$

La resistencia requerida será

$$R = \frac{U_L^2}{P} = \frac{45.000^2}{250.000} = 8.100 \Omega$$

Por tanto se repetirán las simulaciones para este nuevo valor de la resistencia, mucho más adecuado para la instalación.

En la figura 3.34 se puede comprobar que la reducción de la sobretensión es del 15% al cabo de los 10 ms posteriores a la desconexión, y en la que la energía almacenada se evacua en forma de calor por medio de la resistencia R.

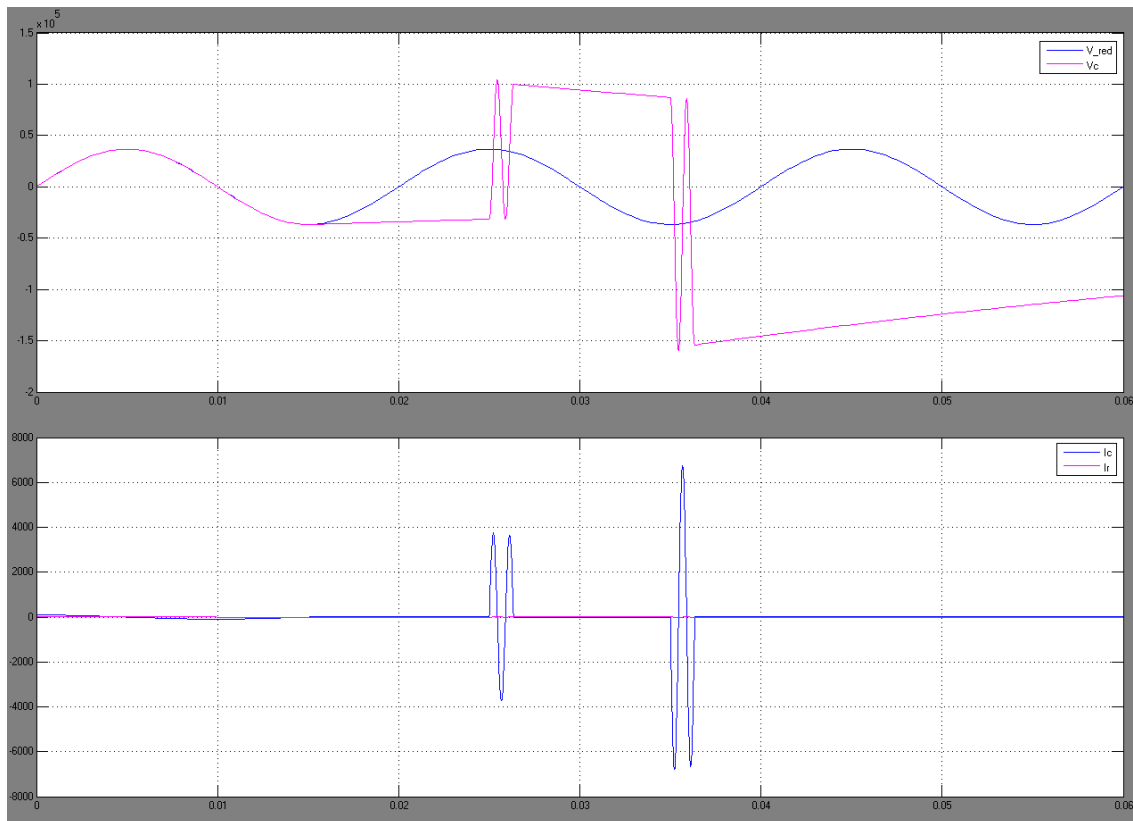


Figura 3.34 Tensión en la batería de condensadores C (rosa) y tensión de la red (azul) en la parte superior, y corriente en el condensador (azul) y corriente de la red (rosa).

En la figura 3.34 inferior podemos observar como la corriente que circula por la batería es ligeramente inferior al resultado de la anterior simulación con la resistencia R'.

En la figura 3.35 se presenta la TTR resultante después de cambiar el valor de la resistencia. Se puede comprobar cómo los valores máximos de la TTR se reducen, pues en el primer cebado pasa de un valor de 73.500 V a un valor de 68.000 V y supone una reducción de un 8% en la solicitud del interruptor. Y en el segundo cebado de arco pasa de -142.000 V a un valor cercano a -124.000 V que supone una reducción de casi el 13% en la TTR que debe de soportar el interruptor.

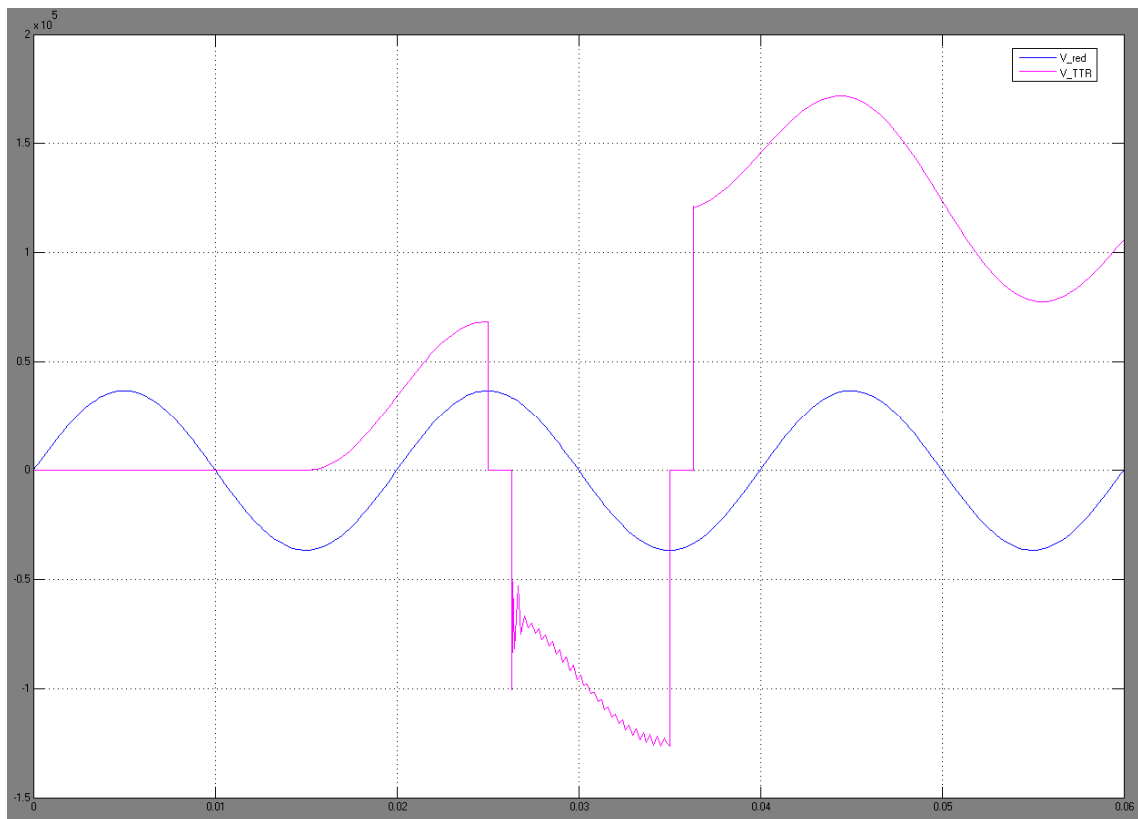


Figura 3.35 Tensión transitoria de restablecimiento, TTR (naranja) y tensión de la red (amarillo)

Estos valores reducen en magnitud las solicitudes que deben de soportar las baterías de condensadores, además de los interruptores. Sin embargo ésta reducción no es tan grande como se desearía, pues sólo reducen las sobretensiones en un 15%.

3.3.5 Transitorio de desconexión de baterías trifásicas con neutro aislado

En el presente apartado realizaremos la simulación de la conexión de una batería de condensadores con neutro aislado, para obtener los transitorios de tensión y corriente, y confirmar cuales son los principales factores que influyen en la evolución de las mismas.

Como se estudió en el apartado 2.5, la configuración de la batería de condensadores es muy importante pues si el neutro de la batería de condensadores está aislado las sobretensiones resultantes son mayores y la tensión transitoria de restablecimiento aún mayor, que en el caso de tener el neutro puesto a tierra.

En la figura 3.34 se presenta el modelo del circuito a estudiar. El sistema de estudio en este caso es trifásico, y a diferencia de los demás casos estudiados en este trabajo, esta simulación está modelada con todas las fases del sistema trifásico equilibrado.

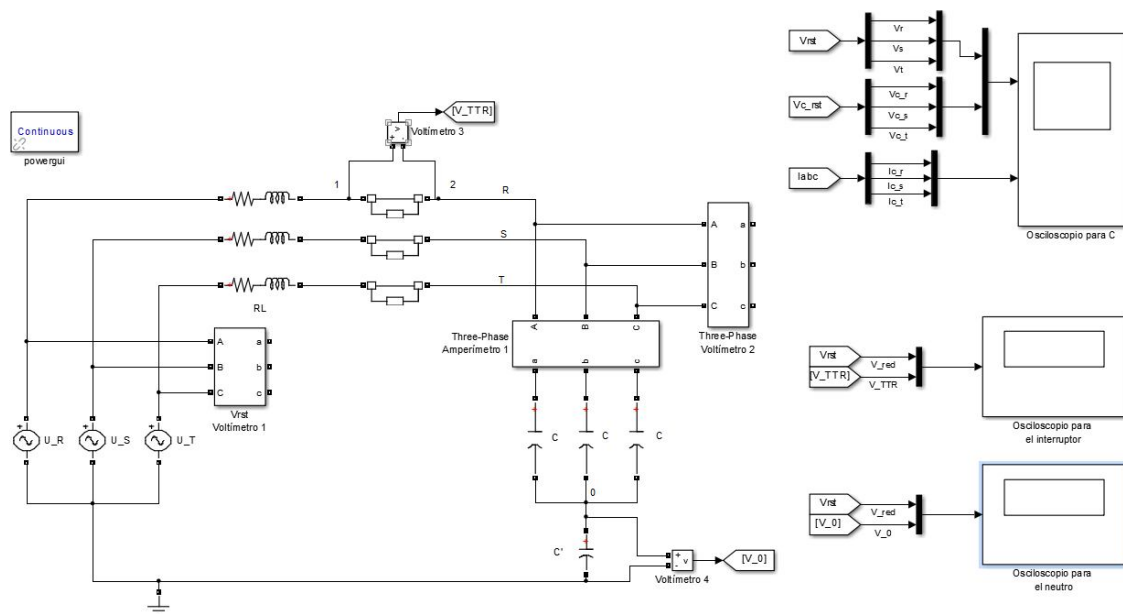


Figura 3.34 Modelo del sistema representado por un circuito trifásico

El modelo de la figura 3.34 representa el sistema eléctrico representado por su equivalente Thèvenin trifásico, el sistema es equilibrado, mediante una fuente trifásica en serie con la línea RL, principalmente inductiva, y un interruptor trifásico. En paralelo a estos dispositivos se encuentra la batería de condensadores trifásica representada por C, la conexión de la batería es en estrella, tal y como se observa en la figura 3.34. Como el neutro de la batería está aislado de tierra la capacidad parásita que aparece entre la tierra y el neutro de la batería se representa mediante la capacidad C' .

Los dispositivos de medida son: Amperímetro 1 que mide la corriente que absorbe la batería de condensadores, Voltímetro 1 que mide la tensión de red, Voltímetro 2 que mide la tensión en la batería de condensadores, Voltímetro 3 que mide la tensión

transitoria de restablecimiento de la fase A del interruptor (puntos 1 y 2 de la figura 3.34) y Voltímetro 4 que mide la tensión entre el punto 0 y tierra. Todas estas medidas se representan en tres osciloscopios, uno para las medidas de C, otro para la tensión transitoria de restablecimiento y el tercero para medir la tensión que se acumula en la capacidad C' .

Cuando se construye el modelo de simulación hay que señalar que Simulink permite la representación de sistemas trifásicos equilibrados utilizando la librería de elementos disponibles en el módulo SimPowerSystems de la herramienta (fuentes trifásicas, impedancias trifásicas serie RLC, impedancias trifásicas RLC en paralelo e interruptores trifásicos). Sin embargo, si se utilizan los elementos trifásicos de esta librería los resultados difieren mucho de los resultados esperados, por lo que es preferible modelar el sistema trifásico ensamblando los diferentes elementos para formar el sistema trifásico a partir de elementos monofásicos. Esta forma de proceder permite, además, tener en cuenta la dispersión entre los tiempos de apertura del interruptor (los tres polos del interruptor no abren en idéntico instante de tiempo).

Los datos de entrada para realizar la simulación son los correspondientes a los del apartado 3.3.1:

Descripción	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión de red de línea	U_r	45	kV
Potencia de cortocircuito de la red	S_{cc}	2.500	MVA
Potencia reactiva del condensador 1	Q_1	5	MVAr
Inductancia de red	L_r	2,6	mH
Resistencia de red ($X/R=14$)	R	58	$m\Omega$
Capacidad de la batería de condensadores	C	7,86	μF
Capacidad parásita entre el neutro de la batería de condensadores y tierra	C'	78,6	nF

Tabla 3.3: Valores de una red de potencia alta

Para realizar la simulación se ha elegido un tiempo total de simulación de 60 ms. Los interruptores trifásicos son reales, es decir no se abren simultáneamente, por tanto se han configurado los interruptores para modelar la dispersión en los tiempos de apertura del interruptor real, el primero abre la fase R en $t=15$ ms (paso por cero de la corriente de la fase R), los otros dos interruptores abren las fases S y T, 5 ms después, en $t=20$ ms.

Extinción del arco en los interruptores

En la figura 3.35 se observa los transitorios de tensión que resultan de la simulación para el intervalo $t = [0: 25)$ ms. La orden de apertura del interruptor se da en un instante posterior a 5 ms, en $t=15$ ms la intensidad en el condensador de la fase R pasa por cero y

se extingue la intensidad en dicha fase. La diferencia de potencial entre las armaduras del condensador es en ese instante igual al valor de cresta de la tensión de red (despreciando el efecto Ferranti en la impedancia interna de red).

Como se puede ver en la figura 3.36 las fases S y T de la red con sus respectivos condensadores todavía constituyen un circuito cerrado, con lo que circula intensidad por dichas fases, lo que hace que exista una diferencia de potencial entre el neutro de los condensadores (punto 0 en la figura 3.36) y tierra, además hay que destacar que la corriente debido a la capacidad parásita C' es muy pequeña y que la tensión en el neutro de la batería aumenta desde la desconexión de R hasta la desconexión de S y T (en $t=20$ ms), tal y como se aprecia en la figura 3.37. Debido a ello la tensión entre el extremo de línea del condensador de la fase R y tierra va aumentando entre $t=15$ ms hasta $t=20$ ms, que es el instante de apertura de los otros dos polos del interruptor de las fases S y T, las corrientes de éstas dos fases pasan por cero, tal y como se aprecia en la figura 3.35.

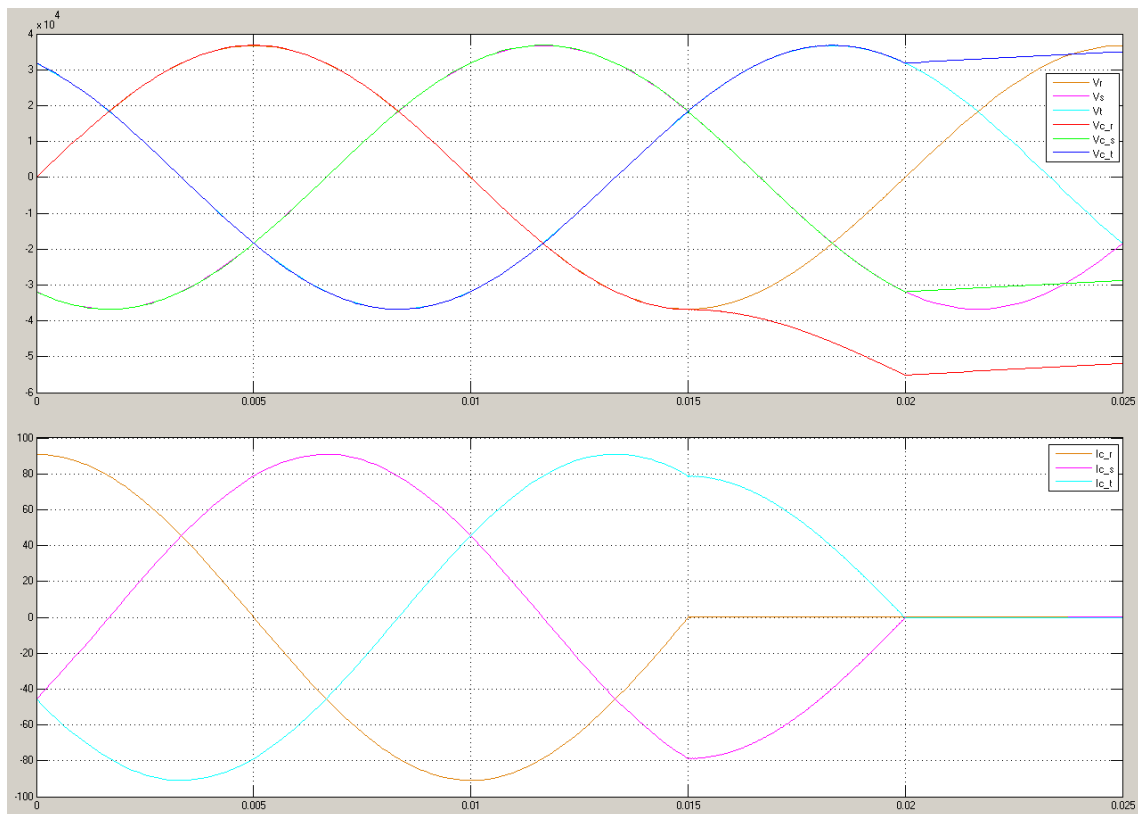


Figura 3.35 Tensión en la batería C (rojo, verde y azul), y tensión de red (naranja, rosa y celeste). Y corriente en la batería (naranja, rosa, celeste) para las fases R, S y T respectivamente

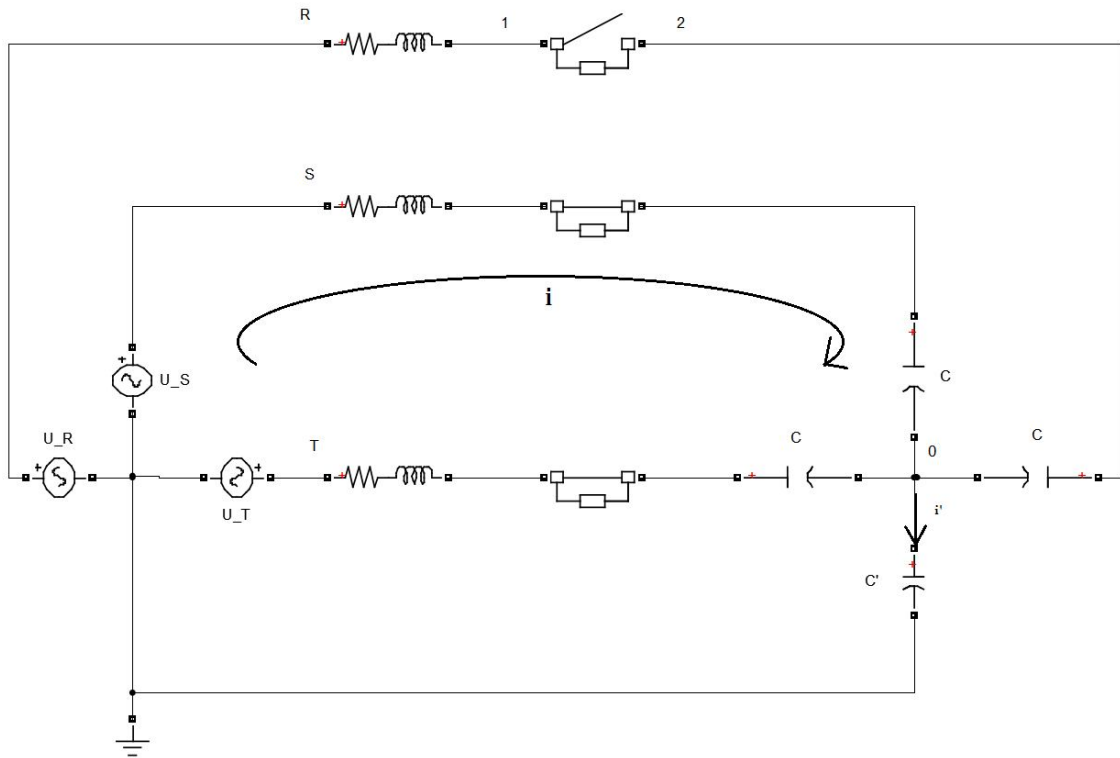


Figura 3.36 Topología del circuito después de la apertura del primer polo (R) en $t=15$ ms

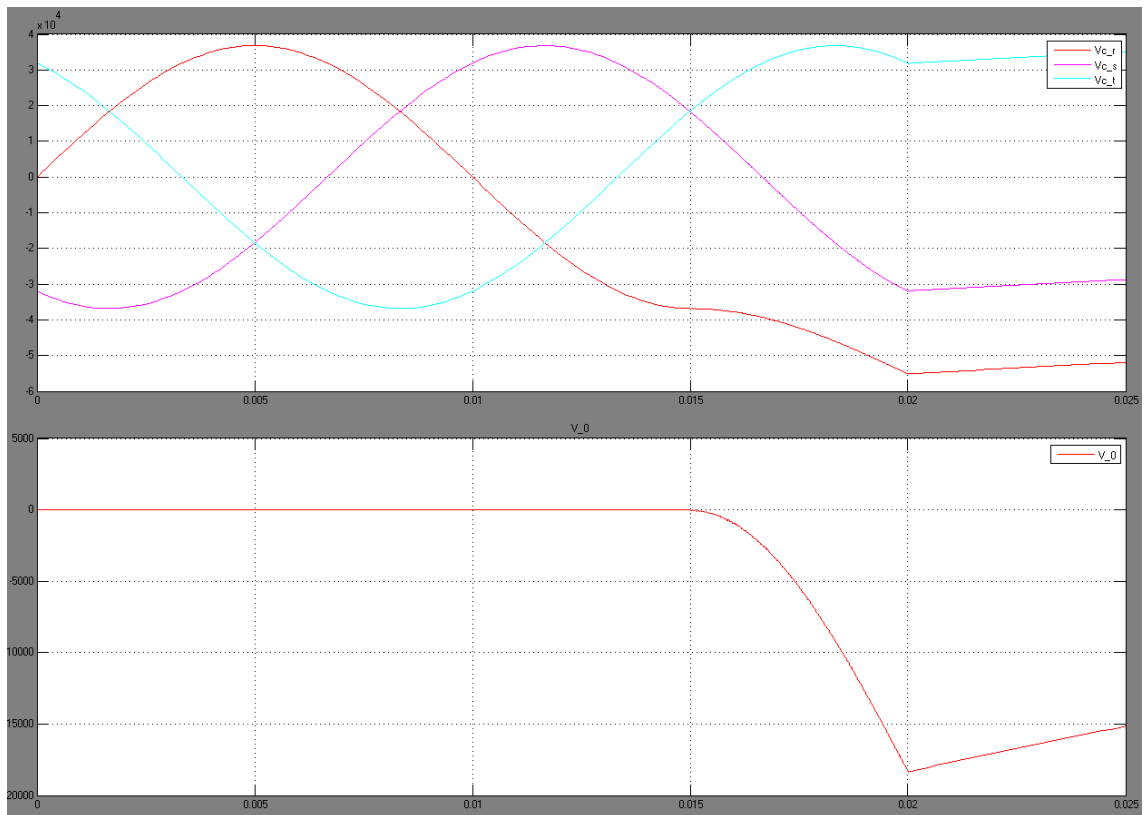


Figura 3.37 Tensión en las fases de los condensadores; rojo R, rosa, S y celeste T (en la parte superior). Y tensión del neutro de la batería (rojo inferior).

En la figura 3.38 se presenta la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) de las tres fases, en ella se puede ver como la TTR crece a partir de cero, en $t=15$ ms, hasta el valor máximo de 91.500 V en $t=25$ ms para la fase R, este valor es 2.5 veces superior al valor de cresta de la tensión de red. En el apartado 2.5 de este trabajo se estudio la evolución de la tensión transitoria de restablecimiento y dedujo la ecuación:

$$u'_{12} = -\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(\text{sen}\omega_0 t + 1,5) \quad (2.33)$$

Si calculamos el valor de cresta obtenemos:

$$U'_{12} = 2.5 \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Con lo cual los datos obtenidos mediante la simulación se ajustan a los valores analíticos calculados de manera teórica.

A partir del momento en que la TTR alcanza su valor máximo, se admite que la rigidez del dieléctrico no soporta la tensión en bornas del interruptor (TTR) y se produce el recebado.

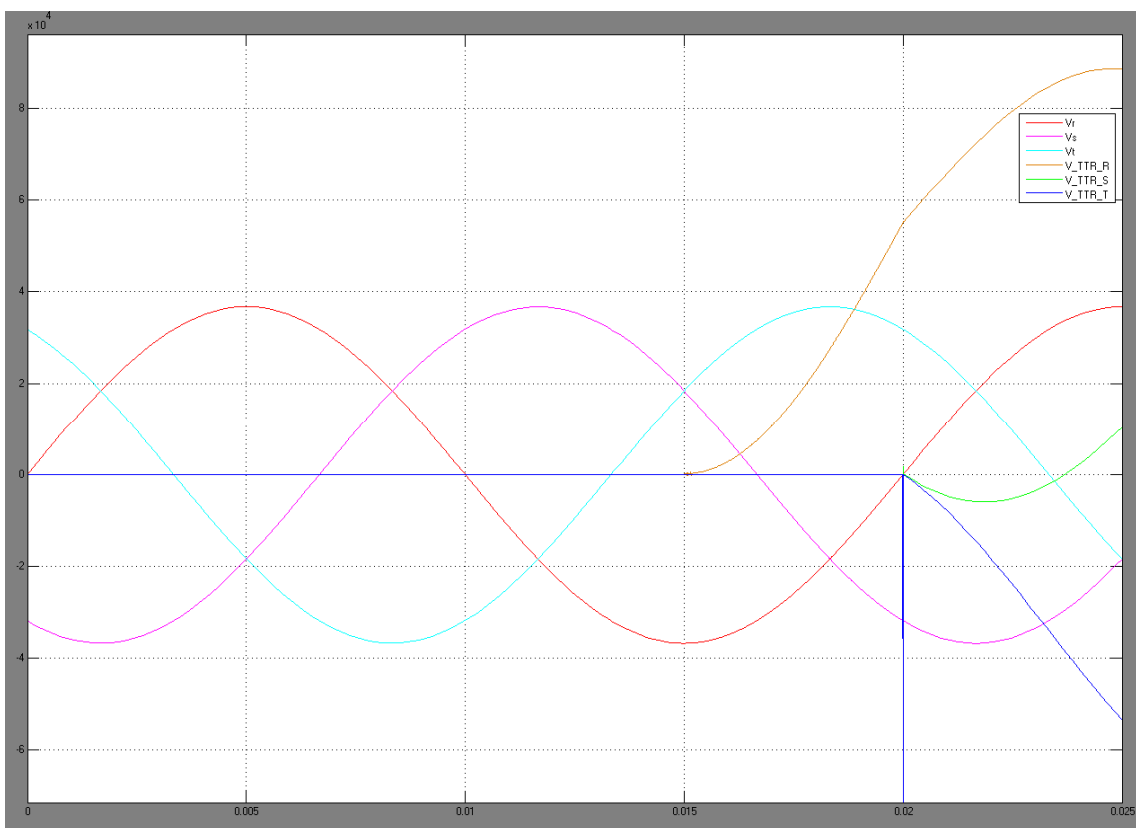


Figura 3.38 Tensión transitoria de restablecimiento (rojo, verde y azul), y tensión trifásica de red (amarillo, rosa y celeste).

En la figura 3.38 se puede apreciar como la TTR de la fase S también crece a partir de cero, solo que en este caso es a partir de $t=20$ ms, y alcanza un valor máximo de 12.600 V en $t=25$ ms. La TTR de la fase T alcanza un valor máximo en $t=25$ ms de -49.100 V.

Todo esto es debido a que el momento de conexión es inferior a 5 ms después de la apertura de la fase R. Como se estudio en el apartado teórico 2.5 si la dispersión en los tiempos de conmutación de los interruptores, desde que se abre la primera fase hasta la apertura de los restantes, es superior a 5 ms, el valor de la TTR en la primera fase que abre es de 3 veces la tensión de red. Más adelante se verá que si el tiempo de conexión de las fases S y T es mayor a 5 ms después de la fase R, la TTR de la fase R debería de acercarse al valor de 3 veces la tensión de red.

Recebado del arco

El recebado del arco tiene lugar en los instantes $t= [25: 25,9]$ ms, en esta simulación sólo se ha simulado un cebado de arco, que a diferencia con el apartado 3.3.4 se simularon 2. Como la primera fase en abrir es la R, la tensión transitoria de restablecimiento será mayor en esta fase, tal y como se aprecia en la figura 3.38. Se ha admitido que la TTR del interruptor de la fase R supera la rigidez dieléctrica del medio entre contactos en $t=25$ ms y se ceba el arco en la fase R.

Al igual que en la apertura, la dispersión en los tiempos de cierre, debido a que los interruptores son reales, es un factor muy importante. En esta simulación cierran en un instante $t=25$ ms ya que se supone que en ese instante la rigidez del dieléctrico se rompe dando lugar al recebado en cada una de las fases.

Cabe destacar que en la simulación se ha tenido muchas dificultades a la hora de seleccionar los tiempos de cierre de los interruptores debido a que, una vez cerrada la primera fase R, las TTR de las fases restantes crecen muy rápidamente llegando a sobrepasar ampliamente el valor máximo de la TTR de la fase R en tan solo 0,2 ms, por tanto para esta simulación se ha decidido cerrar las tres fases a la vez en $t=25$ ms.

En la figura 3.39 se pueden ver los transitorios que tienen lugar en el primer recebado, como puede apreciarse en la figura se ha simulado el recebado desde $t=25$ ms hasta $t=40$ ms, esto no quiere decir que el recebado dure 15 ms, sólo se ha simulado la aparición del arco dejando el interruptor cerrado. Como se puede comprobar el valor de la sobretensión que alcanza la fase R es de 127.000 V, que en comparación con el caso 3.3.4 con neutro a tierra, es un 20% superior.

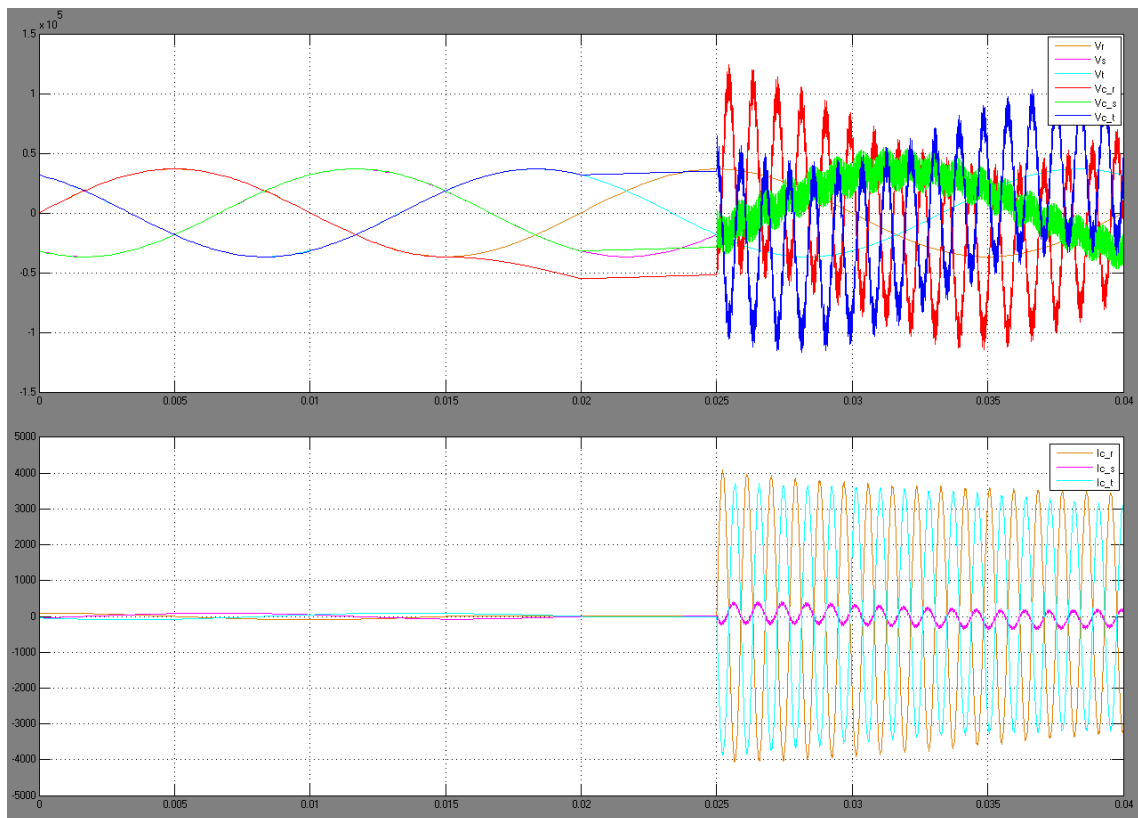


Figura 3.39 Tensión en la batería C (rojo, verde y azul), y tensión de red (naranja, rosa y celeste) en la parte superior. Y corriente en la batería (naranja, rosa, celeste) en la parte inferior, para las fases R, S y T respectivamente

Las fases S y T obtienen valores de sobretensión menores, como era de esperar, aunque no menos importantes pues la fase T recibe un valor pico de 115.000 V, y la fase S un valor de 54.000 V.

En la figura 3.40 se muestra un zoom de la figura 3.39 inferior, en la cual se muestra los transitorios correspondientes a la corriente, en ella se puede ver que el valor pico de la corriente que absorbe la batería de condensadores es de 4.000 A con una frecuencia de 1.111 Hz en la fase R y T, mientras que en la fase S el transitorio es muy pequeño y solo alcanza un valor pico de 590 Amperios y la misma frecuencia.

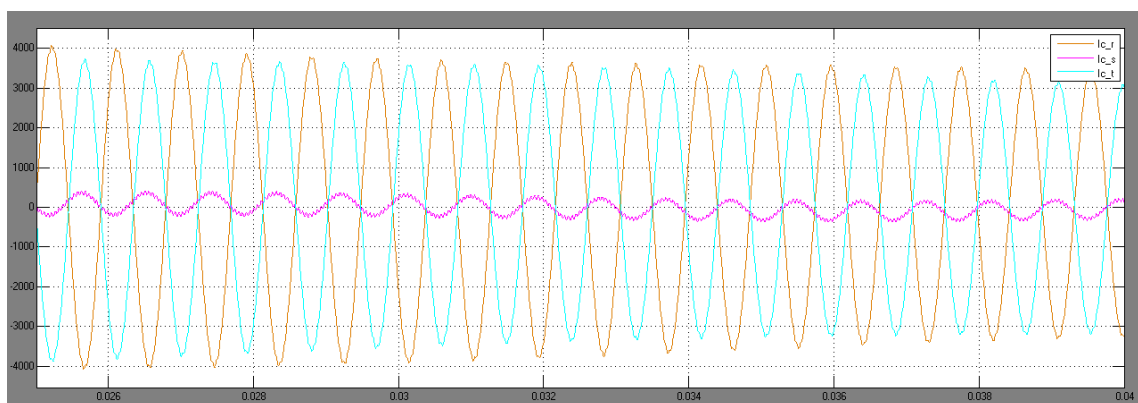


Figura 3.40 Zoom de la figura 3.39 (corriente en la batería de condensadores)

En la figura 3.41 y 3.42 se muestra la tensión en bornas del condensador C' , en ella se puede observar que el resultado del cebado del arco da lugar a una sobretensión oscilante en torno a cero durante el cebado y, hasta que el cebado acaba éste toma el valor de tensión resultante, que en este caso es de -146.000 V.

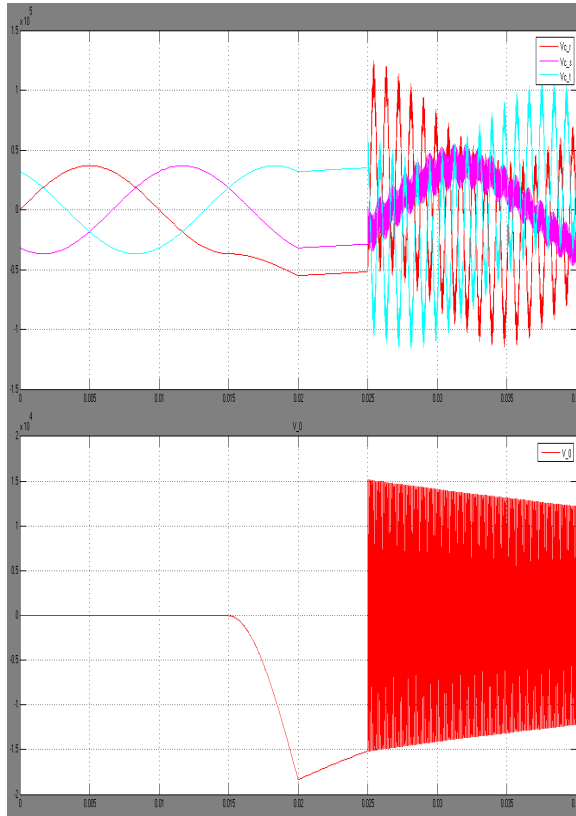


Figura 3.41 Tensión en la batería de condensadores (en la parte superior), y tensión del neutro de la batería en la parte inferior. Duración del cebado 15 ms

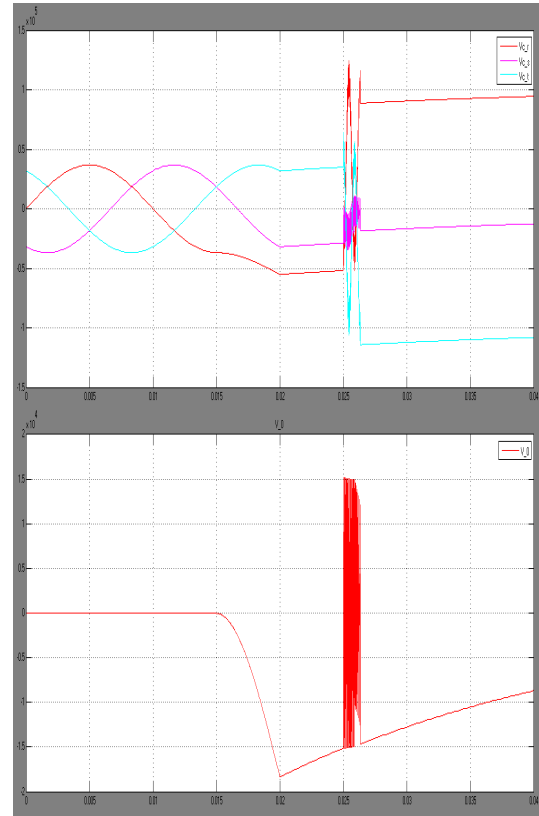


Figura 3.42 Tensión en la batería de condensadores (en la parte superior), y tensión del neutro de la batería en la parte inferior. Duración del cebado 0.9 ms

Las fases S y T obtienen valores de sobretensión menores, como era de esperar, aunque no menos importantes pues la fase T recibe un valor pico de 108.000 V, y la S 37.500 V.

En la figura 3.43 se muestra la tensión transitoria de restablecimiento (TTR), en ella se aprecia que el valor máximo de la TTR es de 145.000 V, cuando la tensión de la fase R es máxima en $t=35$ ms. Este valor es 4 veces el valor de la tensión de red, y representa un aumento de un 37% respecto de la TTR cuando el neutro está a tierra.

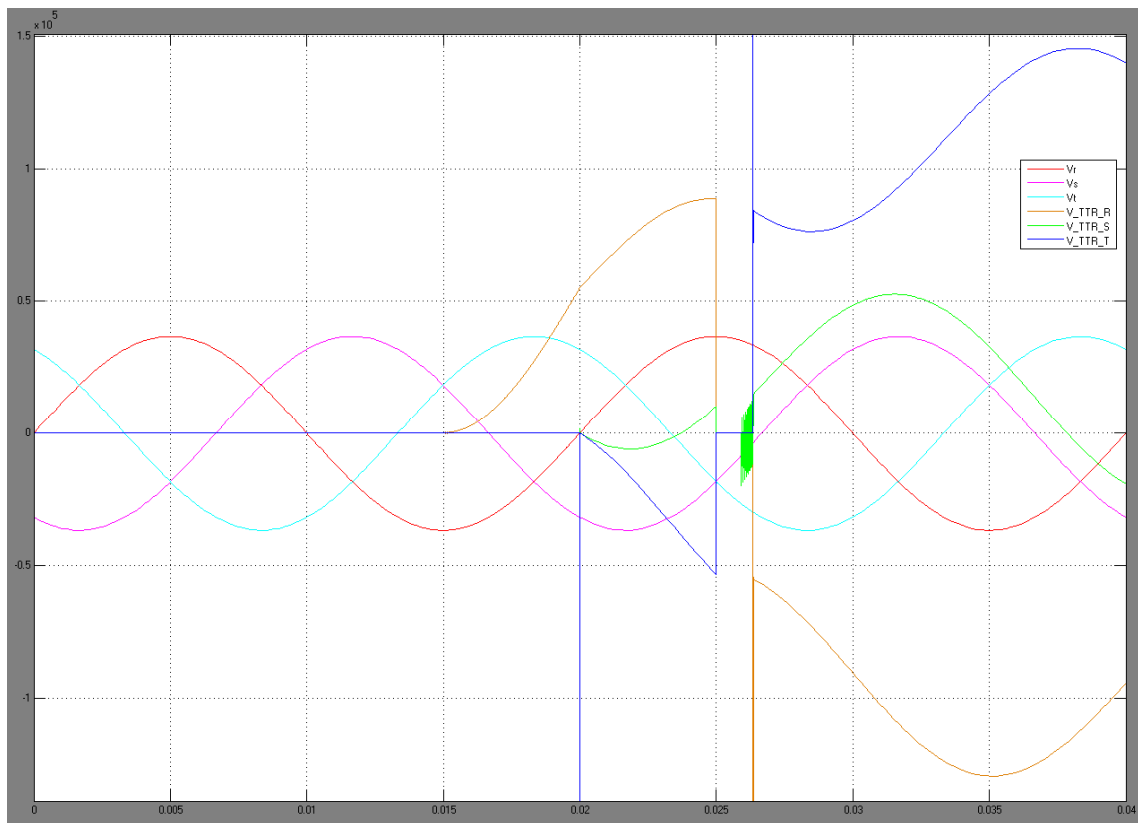


Figura 3.43 TTR para las fases R, S y T (naranja, verde y azul), y tensión de red R, S y T (rojo, rosa y celeste) respectivamente.

Los valores de tensión alcanzados por la TTR son los esperados, y vemos como ésta sigue su ascenso en los siguientes recibidos, en especial en las fases R y T, y en menor medida la fase S.

Los resultados de las TTR de las fases S y T son menores en comparación con la fase R, en la figura 3.43 se puede apreciar que el valor pico que alcanza cada una es menor.

Como se ha comprobado las sobretensiones resultantes en el caso de que la batería de condensadores tenga el neutro aislado, resultan mayores comparadas con el caso en que tengan el neutro puesto a tierra. Sin embargo en el caso de las corrientes esto no ocurre de igual manera pues el valor es el mismo en ambos casos y también en los dos recibidos. La explicación de este hecho es que la corriente que circula por la capacidad C' es tan pequeña que no supone un factor relevante a tener en cuenta.

En la figura 3.44 se muestra el resultado de la simulación del proceso de apertura del interruptor trifásico, suponiendo que sólo hay un recibido de duración 0.9 ms, este va desde $t=25$ ms hasta $t=25.9$ ms. Al finalizar el recibido la tensión con que queda cargada la batería de condensadores es mayor, como se esperaba, que la que tenía antes del recibido.

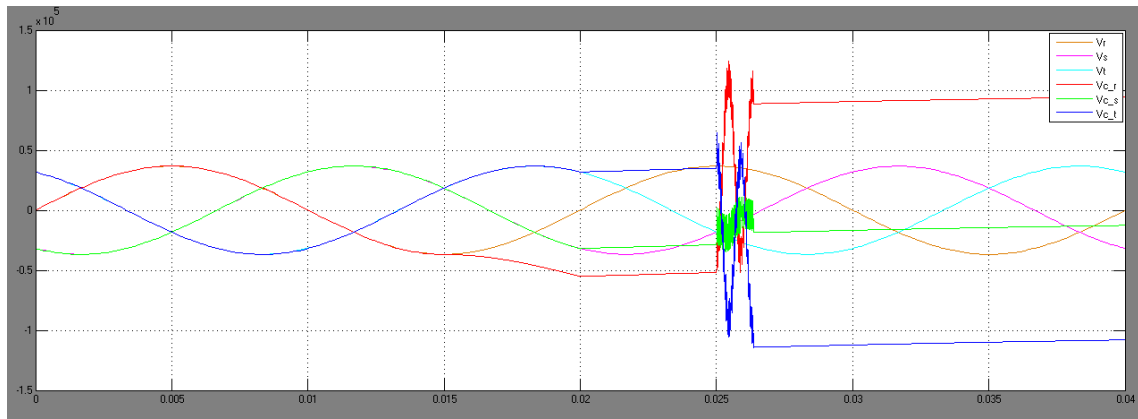


Figura 3.44 Tensión en la batería de condensadores C, para las fases R, S y T (rojo, verde y azul). Y tensión de red para las fases R, S y T (naranja, rosa y celeste).

Caso de dispersión en los tiempos de apertura mayor a 5 ms.

En el presente caso se simulará la evolución de los transitorios que tienen lugar en la batería de condensadores, si el tiempo desde que se abre la primera fase hasta que se abren las restantes es superior a 5 ms.

Para ello se configuran los tiempos de los interruptores del modelo. El interruptor de la fase R es el primero en abrir en $t = 15$ ms, ahora las restantes fases (S y T) abren en un instante posterior a 20 ms, en este caso se elige 21 ms.

En la figura 3.45 se puede observar el resultado de la simulación y de cómo la TTR de la fase R alcanza un valor máximo de 110.000 V, este valor es 3 veces la tensión máxima de red. Por tanto queda demostrado que, tal y como se estudió en el apartado 2.5, la dispersión en los tiempos de apertura de los interruptores es un factor muy importante ya que según la rapidez y simultaneidad con que se abran o cierren, la instalación y los aislantes trabajarán en el peor de los casos, disminuyendo con ello la vida útil de estos y la seguridad.

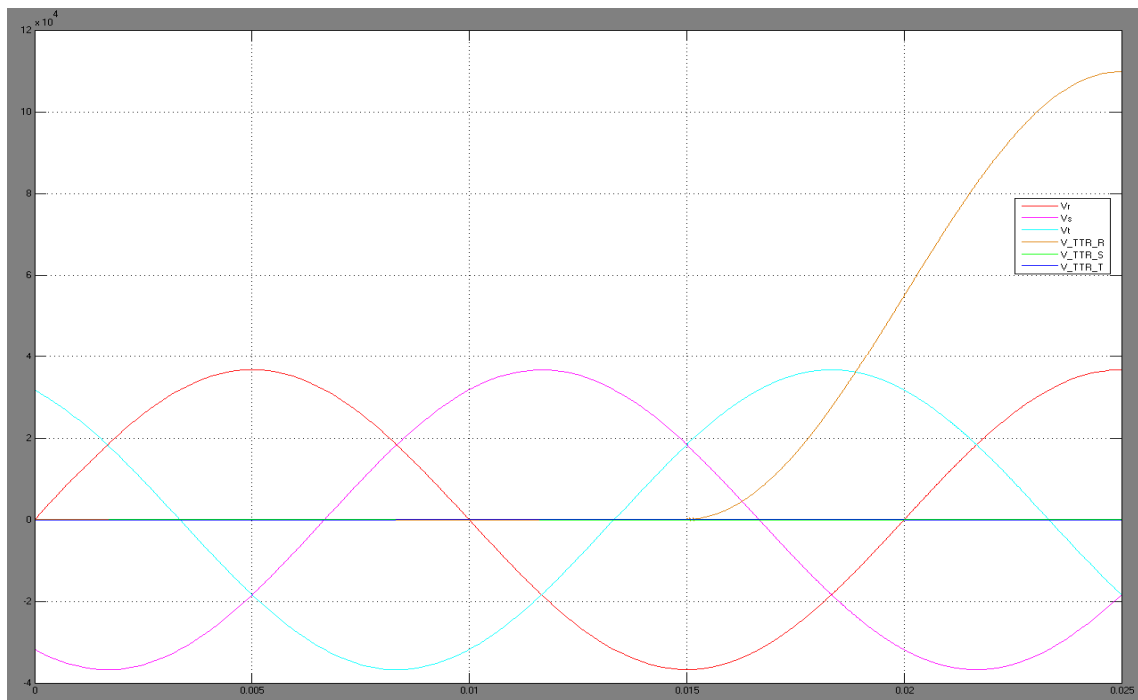


Figura 3.45 TTR de la fase R en naranja, y Tensión de red para las fases R, S y T (rojo, rosa, y celeste)

CAPÍTULO 4

4.1 Resumen del trabajo realizado y conclusiones de los estudios

En el presente trabajo se han estudiado los procesos transitorios que acompañan a las maniobras que el sistema eléctrico realiza todos los días del año. Las sobretensiones resultantes de la conexión y desconexión de baterías de condensadores a la red eléctrica se pueden transmitir a lo largo de las líneas de transmisión ocasionando que la tensión se eleve en puntos muy distantes.

En la simulación 3.3.1 se simuló el transitorio de conexión de un condensador a la red. Como la red eléctrica consta de 3 fases, y en algunos casos de un neutro, en este apartado sólo se ha realizado el estudio suponiendo que la red y la batería de condensadores están unidas mediante la conexión Y-y y con el neutro puesto a tierra. Por ello el estudio del caso mediante el uso de su equivalente monofásico es de gran ayuda, pues las tres fases se comportan de manera independiente. En este apartado se ha estudiado la influencia de la relación X/R, puesto que este valor suele variar en función de la red en la que se trabaje, también se ha estudiado la influencia de la potencia de cortocircuito de la red en los transitorios de tensión y corriente, además de el caso en que la batería de condensadores esté inicialmente cargada.

Las conclusiones a las que se ha llegado se presentan a continuación:

Influencia de X/R			
X/R	Tensión (kV)	Corriente (A)	Frecuencia (Hz)
14	73	2.000	1.111
7	73	2.000	1.111
3,5	72,5	2.000	1.111

Tabla 4.1 Datos obtenidos mediante simulación del caso 3.3.1

La influencia de la relación X/R en los transitorios de tensión y corriente parece ser muy pequeña para los valores que comúnmente se utilizan.

Influencia de la Potencia de cortocircuito					
Sc _c (MVA)	L (mH)	R (Ohm)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Frecuencia (Hz)
2.500	2,6	0,058	73	2.000	1.111
500	12,9	0,289	72	900	500
100	64,5	1,44	67,7	493	222

Tabla 4.2 Datos obtenidos en la simulación 3.3.1

El estudio realizado para distintos valores de potencia de cortocircuito tiene una repercusión pequeña en el transitorio de tensión, sin embargo podemos comprobar mediante la tabla 4.2 que, a medida que reducimos la potencia de cortocircuito de la red el valor de la sobrecorriente disminuye en gran medida, al igual que la frecuencia del transitorio.

Influencia de la tensión inicial en la batería			
Vcondensador(t=0)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Frecuencia (Hz)
0	73	2.000	1.111
-36.742 V	110	4.000	1.000

Tabla 4.3 Datos obtenidos mediante simulación del caso 3.3.1

La influencia que tiene, sobre los transitorios de tensión y corriente, la carga inicial de la batería de condensadores es bastante importante pues se da un aumento del 50% en la sobretensión y un aumento del 100% en la corriente que la batería de condensadores debe de absorber.

En la simulación 3.3.2 se realizó la simulación de la conexión de un banco de condensadores en escalones, en esa simulación se introdujeron las reactancias limitadoras de corriente que se suelen incorporar en las baterías por escalones para mitigar las sobreintensidades que resultan cuando se conectan los sucesivos escalones. Al igual que en el apartado 3.3.1 la simulación se realizó con su equivalente monofásico, y la red se modeló con el equivalente Thèvenin. Al tener el neutro unido a tierra se pueden estudiar las fases de manera independiente. En este apartado se han comprobado los resultados obtenidos de forma teórica ya que el cálculo de sobretensiones y sobrecorrientes de un banco de condensadores de forma analítica es muy complicado debido al número de ecuaciones diferenciales necesarias para su resolución, además se ha estudiado el efecto de las reactancias limitadoras de corriente.

Los resultados de las simulaciones y del estudio de las variables que a nuestro criterio han sido las más importantes en la conexión de una batería de condensadores por escalones se presentan a continuación.

Influencia del instante de conexión			
t (ms)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Frecuencia (Hz)
5	4,4	2.180	235
7,5	3,15	450	260
10	2,7	180	250

Tabla 4.5 Resultados de la simulación 3.3.2

Con los datos obtenidos en la tabla 4.5 podemos llegar a la conclusión de que el mejor momento para la conexión de la batería de condensadores es cuando la tensión pasa por cero, en ese instante las tensiones y corrientes que circulan son mínimas.

Influencia de la reactancia L_1					
L_1 (μH)	S_{cc} (MVA)	L (mH)	R ($\text{m}\Omega$)	Tensión (kV)	Corriente (A)
20	3.000	3.2	280	4,4	2.180
200				4,4	800
2000				4,4	480

Tabla 4.6 Resultados de la simulación 3.3.2

Con los datos de la tabla 4.6 podemos llegar a la conclusión de que la reactancia L_1 es un factor importante pues para grandes valores de L_1 , la corriente que absorben los escalones se ven disminuidos en gran medida. Sin embargo no podemos decir lo mismo con respecto a las tensiones.

En la simulación 3.3.3 se estudia el mismo caso, pero prescindiendo de las reactancias limitadoras de corriente. En este caso se supuso que el valor de la reactancia limitadora era de 2 μH , con ello se obtuvo los transitorios cuyos valores vienen resumidos en la tabla 4.7:

Influencia de la reactancia L_1					
L_1 (μH)	S_{cc} (MVA)	L (mH)	R ($\text{m}\Omega$)	Tensión (kV)	Corriente (A)
20	9	3,2	280	4,4	2.180
2				5	6.400

Tabla 4.7 Datos obtenidos de la simulación 3.3.3

Sin embargo y como se estudio en los capítulos anteriores existe un caso peor aún, en el que se pueden obtener sobretensiones y sobrecorrientes mayores. Este caso se da cuando la capacidad C_2 está inicialmente cargada y se prescinde de las reactancias limitadoras entre las capacidades C_1 y C_2 . Los resultados se presentan en la tabla 4.8:

Influencia de la tensión inicial en la batería C_2					
$V_{c2}(t=0)$	S_{cc} (MVA)	L (mH)	R ($\text{m}\Omega$)	Tensión (kV)	Corriente (A)
0	9	3,2	280	4,7	6.250
-2.450				5,8	13.000

Tabla 4.8 Datos resumidos de la simulación 3.3.3

Después de realizar las simulaciones y probar con múltiples valores, se puede llegar a la conclusión de que la existencia de una carga inicial en la segunda capacidad C_2 de la batería de condensadores, tendría un efecto muy negativo en la instalación, obligando a los dispositivos a evacuar toda esa energía de manera rápida y segura.

En la simulación 3.3.4 se estudia la desconexión de la batería de condensadores, este caso es de gran importancia pues en la maniobra de desconexión se alcanzan valores que triplican la tensión nominal en bornas del interruptor y puede ser causa de fallos en los mismos. Además los cebados que tienen lugar en el instante de apertura del interruptor cargan la batería a valores mayores de tensión pudiendo provocar un mal funcionamiento de los mismos. La simulación se ha realizado con los datos y modelo del apartado 3.3.1, los resultados obtenidos se han comprobado mediante el uso de las ecuaciones que se han estudiado en el apartado 2.3, y además se ha dimensionado una

resistencia de descarga que permita evacuar la carga almacenada en la batería de condensadores para mitigar los problemas que suceden durante la maniobra de desconexión y que se resumen en la tabla 4.9.

Influencia de la resistencia de descarga								
R(Ω)	t=15 ms	t=25 ms	Primer cebado	t=25,9 ms	t=35 ms	Segundo cebado	t=35,9 ms	t=45 ms
	Tensión (V)	Tensión (V)		Tensión (V)	Tensión (V)		Tensión (V)	Tensión (V)
∞	36.742	36.742		106.000	106.000		173.300	173.300
1.835	36.742	19.000		86.000	47.000		112.400	60.000
8.100	36.742	31.000		100.000	87.000		154.000	135.000

Tabla 4.9 Resumen de los resultados obtenidos en la simulación 3.3.4

Por tanto se llega a la conclusión de que el uso de una resistencia de descarga reduce en magnitud el valor de las tensiones que se producen en la batería de condensadores, además si se dimensionan de manera adecuada se puede cancelar el efecto del escalonamiento de tensión en la batería.

En la simulación 3.3.5 se ha simulado la desconexión de una batería de condensadores con el neutro aislado. Se ha comprobado que este caso de estudio incrementa aún más el valor de las sobretensiones resultantes en bornas de la batería de condensadores, pero aún más la tensión en bornas del interruptor (TTR). Se ha confirmado mediante las simulaciones las fórmulas deducidas en el capítulo teórico, y se han comparado los resultados. Como el valor del efecto capacitivo, representado por C' , es muy difícil de conocer se han realizado simulaciones con diferentes valores para conocer su influencia en la sobretensiones y sobrecorrientes. La dispersión en los tiempos de apertura del interruptor era un factor muy importante, como se vio en la teoría, en las simulaciones también se ha estudiado este caso y se han confirmado mediante las simulaciones. A continuación se presenta un resumen en tablas de los parámetros estudiados:

Influencia del efecto capacitivo C' en la fase R		
C' (nF)	t=15 ms	t=20 ms
	Tensión (V)	Tensión (V)
7,86	36.740	55.800
78,6	36.740	55.000
786	36.740	54.250

Tabla 4.10 Resultados de la simulación 3.3.5

En cuanto al efecto que provoca en las sobretensiones producidas en las baterías de condensadores se llega a la conclusión de que a medida que aumentamos el valor de la capacidad C' (realmente es un efecto capacitivo y no una capacidad puesto que no existe un condensador físico), la tensión resultante disminuye si todos los demás parámetros están fijos.

Influencia de la dispersión en los tiempos de apertura			
Tiempo posterior a la apertura de la fase R	t=15 ms	t=20 ms	
	Tensión (V)	Tensión (V)	TTR (V)
< 5 ms	36.740	52.000	88.500
> 5 ms	36.740	73.300	110.000

Tabla 4.11 Resultados de la simulación 3.3.5

Después de comprobar los resultados, podemos llegar a la conclusión de que si los tiempos de apertura de las fases restantes son mayores a 5 ms, se obtendrán valores mayores de tensión, por tanto se debe de procurar que la apertura de las fases S y T se realicen antes de 5 ms, pues de esta manera haríamos trabajar a los condensadores en mejores condiciones. A lo antes dicho hay que recalcar que si por algún fallo la apertura de las fases restantes no se produce antes de 5ms la instalación, y más concretamente el interruptor, debe ser capaz de soportar los valores de tensión que se producen.

4.2 Estudio económico del Trabajo Fin de Grado

El estudio económico del presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo dar a conocer el impacto económico estimado para la realización del mismo. En este estudio solo se incluyen las partidas que son más importantes.

El tiempo necesario para la realización del Trabajo ha sido de 4 meses a un ritmo de 20 horas semanales, lo que equivaldría a media jornada laboral.

En primer lugar se tiene que nombrar la mano de obra humana, necesaria para la realización del trabajo, en este caso 2 personas; 1 Profesor-Tutor, y un Estudiante ó becario

En segundo lugar los materiales o herramientas que se han utilizado; 1 ordenador de sobremesa cuyo coste asciende a 600 €. La amortización de este equipo si la vida útil del mismo es de 4 años, sería de 150 € por año, y de 50€ en 4 meses.

Y por último el software necesario para la simulación y la edición del trabajo; 1 licencia de Matlab® a coste 150€ válido por un año, 1 licencia de Microsoft® Office a coste 100€ válido por dos años.

A continuación detallan los costes que ha tenido la realización del presente trabajo:

	Concepto	Cantidad	Precio	Coste
Mano de obra	Becario-Estudiante	320 h	6 €	1.920,00 €
	Profesor-Tutor	16 h	30 €	480,00 €
Materiales	Ordenador Sobremesa	1 ud	50 €	50,00 €
Software	Licencia Matlab	1 ud	50 €	50,00 €
	Licencia Office	1 ud	20 €	20,00 €
Total				2.520,00 €

Tabla 4.12 Presupuesto del Trabajo Fin de Grado

4.3 Propuesta de trabajos futuros

Este Trabajo Fin de Grado es el primero de una serie de trabajos encaminados a un aprendizaje más práctico de la asignatura Instalaciones Eléctricas.

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha abordado las sobretensiones debidas a la conexión y desconexión de batería de condensadores, sin embargo hay más tipos de sobretensiones en un sistema eléctrico.

Por lo que se refiere a las sobretensiones temporales, un estudio particularmente interesante es el estudio de las sobretensiones que se tienen cuando una fase del sistema hace contacto con tierra. El estudio mostraría la influencia de la impedancia homopolar en el valor de las sobretensiones en las fases sanas.

También es interesante el estudio de las sobretensiones de frente lento que se tienen en la conexión y reenganche de líneas, este estudio requiere utilizar la teoría de las ondas viajeras para analizar las reflexiones y refracciones de onda al final de una línea larga.

El estudio de las sobretensiones que se producen en la eliminación de faltas de un sistema eléctrico es un estudio de un sistema resonante entre la inductancia de las líneas y la capacidad parásita entre estas y el suelo.

Por último, también cabe realizar el estudio de las sobretensiones en la desconexión de transformadores en vacío, un tanto más complejo por el comportamiento no lineal del núcleo magnético del transformador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Francisco Crespo. "Sobretensiones en Sistemas de Potencia". Capítulo 8.
- [2]. Allan Greenwood. "Electrical Transients in Power Systems". Chapter 5.
- [3]. Juan Antonio Martínez Velasco. "Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión". Capítulo 2.
- [4]. Application Guide. "Live Tank Circuit Breakers". ABB-AB
- [5]. Norma UNE-EN 60831-1:1998. "Condensadores de potencia autorregenerables a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal inferior o igual a 1000 V. Parte 1: Generalidades. Características de funcionamiento, ensayos y valores nominales. Prescripciones de seguridad. Guía de instalación y de explotación."
- [6]. Norma UNE-EN 60831-1/A1:2003. "Condensadores de potencia autorregenerables a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal inferior o igual a 1000 V. Parte 1: Generalidades. Características de funcionamiento, ensayos y valores nominales. Prescripciones de seguridad. Guía de instalación y de explotación."
- [7]. Bank, R. E., W. C. Coughran, Jr., W. Fichtner, E. Grosse, D. Rose, and R. Smith, "Transient Simulation of Silicon Devices and Circuits," IEEE Trans. CAD, 4 (1985), pp. 436–451.
- [8]. Shampine, L. F. and M. E. Hosea, "Analysis and Implementation of TR-BDF2," Applied Numerical Mathematics 20, 1996.
- [9]. J. C. Das. "Transients in electrical systems". Chapter 6.
- [10]. Sohan Darmaraja. "An Analysis of the TR-BDF2 integration scheme". Massachusetts Institute of Technology 2007.
- [11]. Gómez Expósito A. (ed.). "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica". McGraw-Hill, Madrid, 2002.
- [12]. Julio Usaola García. "Líneas de transporte de energía eléctrica". Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Apuntes de Tecnología Eléctrica.